



Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication

Olivier Kerbrat

► To cite this version:

Olivier Kerbrat. Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2009. Français. NNT: . tel-00439589

HAL Id: tel-00439589

<https://theses.hal.science/tel-00439589>

Submitted on 7 Dec 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École Centrale de Nantes

ÉCOLE DOCTORALE

SPIGA « Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture »

Année 2009

N° B.U. :

Thèse de DOCTORAT

Spécialité : GÉNIE MÉCANIQUE

Présentée et soutenue publiquement par :

OLIVIER KERBRAT

le 22 octobre 2009
à l'ENS Cachan – Antenne de Bretagne

TITRE

**MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION D'OUTILLAGES MODULAIRES HYBRIDES
BASÉE SUR L'ÉVALUATION QUANTITATIVE DE LA COMPLEXITÉ DE FABRICATION**

JURY

Président : Patrick MARTIN
Rapporteurs : Bernard ANSELMETTI
François VILLENEUVE

Professeur des universités, Arts et Métiers ParisTech – centre de Metz
Professeur des universités, IUT de Cachan, Université Paris Sud 11
Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble

Examineurs : Éric BOILLAT
Jean-Yves HASCOËT
Pascal MOGNOL
Mickaël GARRET-DALMAIS

Adjoint scientifique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Professeur des universités, École Centrale de Nantes (co-directeur de thèse)
Professeur des universités, Antenne de Bretagne de l'ENS Cachan (co-directeur de thèse)
Réfèrent Méthodologies Calcul, PSA Peugeot-Citroën (invité)

Directeurs de thèse : Pascal MOGNOL / Jean-Yves HASCOËT

Laboratoire : Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, UMR CNRS 6597

N° ED 498-60

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Pascal Mognol et Jean-Yves Hascoët pour m'avoir permis de réaliser ce travail dans d'excellentes conditions. Vous avez réussi à créer un climat propice à mon épanouissement professionnel en me laissant acquérir une certaine autonomie tout en sachant recadrer et orienter l'ensemble dès que nécessaire. Merci beaucoup ! Pascal, j'espère en outre avoir été digne de la confiance que tu as su m'accorder en me proposant ce sujet il y a quelques années.

J'adresse également de sincères remerciements à Bernard Anselmetti et François Villeneuve pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Leur évaluation critique et rigoureuse de ce mémoire aura permis son amélioration.

Je remercie Patrick Martin pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury et Éric Boillat pour être venu de Suisse à cette occasion.

Merci également à Mickaël Garret-Dalmaï d'avoir accepté d'expertiser mon travail avec un œil industriel.

Je souhaite remercier l'ensemble des membres de l'équipe MO2P de l'IRCCyN, notamment pour les agréables moments passés lors de nos déplacements.

J'ai réalisé ce travail de thèse au sein de l'antenne de Bretagne de l'ENS Cachan, j'aimerai donc chaleureusement en remercier l'ensemble du personnel, en particulier Régis, Sébastien, Philippe B. et Philippe B. pour les réunions techniques et Corentin, Georges et Yann pour m'avoir aidé dans mes enseignements de moniteur au département mécatronique. Merci aussi à Renan et Julien pour les bons moments passés au travail et en dehors, bon courage à vous deux pour votre dernière année de thèse, ce n'est pas forcément la plus marrante !

Au-delà de l'aspect purement professionnel, ce travail représente 3 années de ma vie, et c'est donc très logiquement que j'ai une pensée pour tous ceux qui m'ont côtoyé durant cette période. J'aimerai ainsi adresser de profonds remerciements à mes parents et Christine, c'est sans doute grâce à vous que j'ai inconsciemment développé un esprit curieux et un attrait pour la rigueur de la science, deux éléments indispensables à la bonne réussite d'un travail de thèse.

Merci également à Yannou & Cécile, Tchin & Marielle, Mat & Émilie, Pierrot & Solène pour les quelques week-end passés ensemble, certes peu dédiés à la progression de la recherche française en génie mécanique, mais parfaitement divertissants.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers les quelques énergiques rennais composant le fameux triangle des Bermudes à 4 côtés, David, O²olf et Fred. Vous avez dû me supporter tant de fois que cette thèse est un peu devenue la vôtre. Je n'oublie pas non plus le groupe Becario, avec ou sans Anne-Sophie.

Cette thèse n'aurait probablement pas été la même sans Janis Joplin, qui m'a accompagné pendant de longues heures de rédaction...

Et enfin, merci à Anne pour tout et bien plus encore. Rien n'aurait été possible sans ta présence à mes côtés !

Table des matières

REMERCIEMENTS	3
TABLE DES MATIÈRES.....	5
TABLE DES ILLUSTRATIONS	13
GLOSSAIRE	17
CHAPITRE 1 : CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE	19
1. CONTEXTE GÉNÉRAL	20
1.1. Évolution de l'industrie des produits manufacturés.....	20
1.2. Les procédés de fabrication par ajout de matière.....	20
1.2.1. Définition	20
1.2.2. Évolutions des techniques de fabrication par ajout de matière	21
1.2.3. Applications des procédés par ajout de matière	23
1.2.4. Des procédés qui arrivent à maturité.....	24
1.2.5. Synthèse	25
2. LA FABRICATION D'OUTILLAGES	26
2.1. Qu'entendons-nous par « outillages » ?	26
2.2. La maîtrise de la fabrication des outillages	27
2.3. Les spécificités de la fabrication d'outillages et les procédés associés.....	27
2.3.1. Quelques caractéristiques spécifiques à la réalisation d'outillage	27
2.3.2. L'usinage grande vitesse et l'électroérosion	28
2.3.3. Utilisation de procédés par ajout de matière pour réaliser des outillages	29
2.4. Conclusion : de l'utilisation raisonnée et réfléchie des différents procédés de fabrication	30
3. LES OUTILLAGES MODULAIRES HYBRIDES ET LEUR MÉTHODE DE CONCEPTION.....	31

3.1. Définition du concept d'outillages modulaires hybrides	31
3.1.1. Introduction.....	31
3.1.2. Aspect modulaire	31
3.1.3. Aspect hybride	32
3.1.4. L'outillage modulaire hybride	33
3.2. Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides	33
4. SYNTHÈSE SUR LA SITUATION GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE ET PLAN DU MANUSCRIT	35
CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART ET PROBLÉMATIQUE	37
1. MÉTHODE DE CONCEPTION D'OUTILLAGES	38
1.1. Rapide historique.....	38
1.2. À quoi servent les différentes méthodes d'aide à la conception d'outillages ?	38
1.3. Prise en compte de la fabrication de l'outillage dans la conception de produit	39
2. DESIGN FOR MANUFACTURING	41
2.1. Définition et historique.....	41
2.2. Analyses des méthodes de DFM	41
2.2.1. Le type d'approche	41
2.2.2. La mesure de la fabricabilité.....	42
2.2.3. L'interaction utilisateur / système.....	42
2.3. Quelles caractéristiques choisir pour une application au domaine de l'outillage ?	43
2.3.1. Le type d'approche : direct	43
2.3.2. La mesure de la fabricabilité : évaluation quantitative de la complexité de fabrication	43
2.3.3. L'interaction utilisateur / système : données d'entrée = modèle CAO, données de sorties = valeur des indices et cartographies	44
2.3.4. Remarque et synthèse	44
3. L'APPROCHE MODULAIRE	46
3.1. Introduction	46
3.2. La modularité pour améliorer la flexibilité	46
3.3. La modularité pour améliorer la fabricabilité	47
3.3.1. Travaux initiaux en usinage	47
3.3.2. Exemple industriel	47
3.3.3. Domaine de la fabrication par ajout de matière	48

3.3.4.	Contraintes liées au nombre de modules	50
3.4.	Conclusion sur l'aspect modulaire	51
4.	L'APPROCHE HYBRIDE	52
4.1.	Introduction	52
4.2.	Méthodes de comparaisons de procédés	52
4.3.	Limites technico-économiques de l'usinage grande vitesse et des procédés par ajout de matière 53	
4.3.1.	Caractéristiques dimensionnelles	53
4.3.2.	Qualité des pièces	55
4.3.3.	Conclusions sur les limites technico-économiques des procédés	57
4.4.	Outillages fabriqués par combinaisons d'usinage et de fabrication rapide.....	57
4.5.	Conclusion sur l'aspect hybride	58
5.	LE CONCEPT MCP	59
5.1.	Définition.....	59
5.2.	Méthodologie.....	59
5.3.	Les limites du concept	60
6.	PROBLÉMATIQUE DE NOS TRAVAUX DE THÈSE	61
CHAPITRE 3 : ANALYSE DE COMPLEXITÉ DE FABRICATION		63
1.	COMMENT DÉFINIR LA COMPLEXITÉ DE FABRICATION ?	64
1.1.	Études bibliographiques.....	64
1.1.1.	Avant-propos	64
1.1.2.	Les travaux de l'Intelligent Manufacturing Systems Center.....	64
1.1.3.	Les travaux de S.Y. Yang	65
1.1.4.	La complexité selon N.P. Suh	65
1.1.5.	Les travaux du LURPA.....	66
1.1.6.	Les travaux intégrant une approche hybride	67
1.1.7.	Les travaux intégrant une approche modulaire	68
1.1.8.	D'autres définitions de la complexité	69
1.2.	Notre définition de la complexité de fabrication	70
1.3.	Analyse globale / Analyse locale	70

2.	MÉTHODES DE DÉCOMPOSITION D'UN MODÈLE CAO	72
2.1.	L'approche par entités	72
2.1.1.	Introduction.....	72
2.1.2.	Utilisations classiques des approches par entités	72
2.1.3.	Inconvénients majeurs	74
2.1.4.	Synthèse sur les approches par entités	75
2.2.	Le format STL	75
2.3.	Autres types de décompositions volumiques de modèles.....	77
2.3.1.	Travaux dans le domaine informatique.....	77
2.3.2.	Décomposition de modèles adaptée à la Stratoconception	78
2.4.	La décomposition octree	79
2.4.1.	Historique et principe détaillé	79
2.4.2.	Exemples d'applications	82
2.5.	Choix de la décomposition octree pour l'analyse locale	84
3.	PARAMÈTRES À PRENDRE EN COMPTE POUR CALCULER LA COMPLEXITÉ DE FABRICATION.....	86
3.1.	Introduction	86
3.2.	Cas de la fabrication par usinage	86
3.3.	Cas de la fabrication par ajout de matière	88
3.4.	Autre exemple de procédé.....	89
3.5.	Synthèse sur les paramètres influençant la complexité de fabrication et lien vers le calcul des indices	89
4.	DÉFINITIONS DES INDICES DE COMPLEXITÉ DE FABRICATION	91
4.1.	Exemples d'indices provenant de l'analyse bibliographique	91
4.1.1.	<i>Manufacturability Indexes (MIs)</i> des travaux de S.K. Ong.....	91
4.1.2.	<i>Index of Machining Complexity (IMC)</i> des travaux de M. Korosec	92
4.2.	Nos indices de complexité de fabrication	93
4.2.1.	Notations.....	93
4.2.2.	Principe de calcul des indices	94
4.2.3.	Indice pour l'usinage lié aux dimensions maximales.....	94
4.2.4.	Indice pour l'ajout de matière lié aux dimensions maximales	96
4.2.5.	Indice pour l'usinage lié aux dimensions minimales	97
4.2.6.	Indice pour l'ajout de matière lié aux dimensions minimales.....	97
4.2.7.	Indice pour l'usinage lié à la flexibilité de l'outil de coupe.....	99

4.2.8.	Indice pour l'usinage lié à la quantité de copeaux	105
4.2.9.	Indice pour l'ajout de matière lié au volume de la pièce	105
4.2.10.	Indice pour l'ajout de matière lié aux surfaces de peau	106
4.2.11.	Indice local pour l'ajout de matière lié à la hauteur	107
4.2.12.	Indice pour l'ajout de matière lié à la distance par rapport au centre	107
4.2.13.	Indice pour l'usinage lié à la nature des matériaux	109
4.2.14.	Indice pour l'usinage lié à l'état de surface	110
4.2.15.	Perspectives : la création de nouveaux indices	111
4.2.16.	Tableau récapitulatif des indices qui sont développés	111

5. SYNTHÈSE SUR L'ANALYSE DE LA COMPLEXITÉ DE FABRICATION 112

CHAPITRE 4 : MÉTHODE DE CONCEPTION D'OUTILLAGES MODULAIRES HYBRIDES..... 113

1. PRÉAMBULE..... 114

2. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA MAQUETTE INFORMATIQUE 115

2.1. Introduction 115

2.2. Choix des logiciels..... 115

2.2.1. Support principal : SolidWorks 115

2.2.2. Aspects programmations : Visual Basic Applications 116

2.2.3. Présentation des résultats : Microsoft Excel 116

2.3. Représentation par objets 116

2.3.1. Introduction..... 116

2.3.2. La classe PIECES 117

2.3.3. La classe MACHINES..... 118

2.3.4. La classe OUTILS 120

2.3.5. La classe OCTANTS 121

2.3.6. La classe ETUDES 124

2.3.7. La classe COMPARAISONS 125

2.3.8. Organisation et liens des différentes classes 125

2.4. Conception de l'interface 126

2.4.1. Interface principale 126

2.4.2. Interface correspondant aux calculs des indices 128

2.4.3. Interface correspondant aux comparaisons entre les études..... 129

2.4.4. Liens entre la maquette informatique et la méthodologie de conception..... 129

3. PREMIER EXEMPLE SUR UNE PIÈCE-TEST 131

3.1. Présentation de l'étude..... 131

3.2.	Choix de la pièce-test.....	131
3.3.	Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la pièce-test monobloc	132
3.4.	Exploitation des résultats.....	133
3.4.1.	Objectif	133
3.4.2.	Exploitation des indices globaux	133
3.4.3.	Exploitation de l'indice local et de la cartographie.....	134
3.4.4.	Choix des modules.....	135
3.5.	Analyse de complexité de fabrication par usinage pour les modules	136
3.5.1.	Calculs des indices et cartographies pour les deux modules.....	136
3.5.2.	Regroupement des deux modules	137
3.6.	Comparaison des analyses pour la pièce monobloc et pour les modules	138
3.7.	Synthèse sur ce premier exemple	139
4.	DEUXIÈME EXEMPLE, DEUXIÈME PIÈCE-TEST	140
4.1.	Conception de la nouvelle pièce-test	140
4.2.	Analyse de complexité de fabrication par usinage pour cette deuxième pièce-test.....	140
4.3.	Exploitation des résultats.....	141
4.3.1.	Deux types d'octants avec une complexité de fabrication élevée	141
4.3.2.	Première alternative : point de vue modulaire	142
4.3.3.	Deuxième alternative : modification des paramètres de conception.....	144
4.3.4.	Troisième alternative : point de vue hybride.....	144
4.4.	Analyse de complexité de fabrication pour la deuxième pièce-test conçue avec l'approche hybride	146
4.5.	Comparaison entre la conception monobloc et la conception modulaire hybride	147
4.6.	Synthèse sur ce deuxième exemple	148
5.	TROISIÈME EXEMPLE : DÉTECTION D'INCOMPATIBILITÉS ENTRE MODÈLE NUMÉRIQUE ET PROCÉDÉ DE FABRICATION.....	149
5.1.	Objectif	149
5.2.	Arêtes vives incompatibles avec un procédé d'usinage	149
5.3.	Formes intérieures incompatibles avec un procédé d'usinage.....	150
6.	POUR ALLER UN PEU PLUS LOIN... ..	152
6.1.	Limites des possibilités de la méthodologie	152

6.2. Perspectives d'améliorations	152
6.2.1. Création des modèles numériques des modules	152
6.2.2. Comparaison des indices.....	152
 7. POINTS FORTS DE LA MÉTHODOLOGIE	153
7.1. Utilisation en phase de conception	153
7.2. Détermination de la complexité de fabrication	153
7.3. Connaissance des zones les plus complexes à fabriquer	153
7.4. Recommandation pour diminuer la complexité de fabrication	154
7.5. Détection des incompatibilités entre modèle numérique et procédé de fabrication.....	154
 CHAPITRE 5 : APPLICATIONS INDUSTRIELLES	155
 1. ÉTUDE DE L'OUTILLAGE AFOPLAST	156
1.1. Présentation de la société	156
1.2. Présentation de la pièce étudiée.....	156
1.3. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la pièce monobloc	158
1.4. Exploitation des résultats et point de vue modulaire.....	159
1.5. Analyse de complexité de fabrication pour les modules	160
1.6. Comparaison des conceptions monobloc et modulaire.....	161
1.7. Lien avec la solution intuitive existante	162
 2. ÉTUDES DES OUTILLAGES PSA PEUGEOT-CITROËN	163
2.1. Cadre du travail : le projet EMOA.....	163
2.1.1. Contexte du projet.....	163
2.1.2. Description synthétique du projet	164
2.1.3. Optimisation des conceptions d'outillages pour la maîtrise du coût de réalisation.....	164
2.1.4. Conclusion	165
2.2. Choix des outillages étudiés	166
2.3. Étude du poinçon	167
2.3.1. Analyse de complexité de fabrication par usinage	167
2.3.2. Points de vue modulaire et hybride.....	168
2.3.3. Analyses de complexité de fabrication pour le poinçon modulaire	169

2.3.4.	Comparaison entre les complexités de fabrication des conceptions monobloc et modulaire....	170
2.4.	Étude de la matrice.....	171
2.4.1.	Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la matrice monobloc	171
2.4.2.	Exploitation de l'indice $C_i(f)$	172
2.4.3.	Analyse de complexité de fabrication par ajout de matière pour la matrice monobloc et point de vue hybride	173
2.4.4.	Analyse de complexité de fabrication pour la conception modulaire hybride de la matrice	174
2.4.5.	Comparaison entre les conceptions monobloc et modulaire hybride pour la matrice	175
3.	CONCLUSION SUR LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES	176
CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES		
.....		177
1.	SYNTHÈSE DU TRAVAIL EFFECTUÉ.....	178
2.	CONCLUSIONS : LES APPORTS DE NOTRE TRAVAIL.....	181
3.	PERSPECTIVES	183
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		187
ANNEXE : FIGURES POUR IMPRESSIONS COULEURS		203

Table des illustrations

Remarque : les illustrations nécessitant une impression couleur sont marquées d'un astérisque () dans la légende et sont annexées à la fin du document.*

Figure 1. Principe de la fabrication par lit de poudre [NOB05].....	21
Figure 2. Principe de la fabrication par projection de poudre [NOB05].....	21
Figure 3. Secteurs utilisant des produits issus des techniques de fabrication additives [WHO07].	23
Figure 4. Applications des procédés de fabrication additive [WHO07].....	24
Figure 5. Évolution du cycle de développement d'une technologie [LEV03].	24
Figure 6. Répartition des coûts d'un outillage d'emboutissage dans le domaine automobile [PSA07].	27
Figure 7. Gamme d'obtention d'une empreinte [JEG03].	28
Figure 8. Moule de balle de golf [EOS02].....	30
Figure 9. Deux variantes de modèles de produits [KER09a].	31
Figure 10. Outillage modulaire pour deux variantes de produits [KER09a].....	32
Figure 11. Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides en 6 étapes [KER09b].	34
Figure 12. Connaissances des concepteurs en procédés de fabrication [HOW03].....	39
Figure 13. Caractéristiques de la méthodologie de conception d'outillages vis à vis d'une approche DFM.	45
Figure 14. Exemple d'outillage flexible [LI99].....	47
Figure 15. Noyau modulaire de moule pour la fonderie de précision.	48
Figure 16. Décomposition volumique d'une hélice [CHA03b].	49
Figure 17. Modèle modulaire de corps de joint de cardan [DIM07].	49
Figure 18. Décomposition d'une tranche de Stratoconception en trois modules [HOU07].	50
Figure 19. Recherche d'un nombre de modules optimal [TSA99].....	50
Figure 20. Relation profondeur de passe - dureté du matériau [KEC03].	53
Figure 21. Relation profondeur de passe - rapport L/D [KEC03].	53
Figure 22. Limites dimensionnelles des nervures [EOS02].....	54
Figure 23. Limites dimensionnelles des pions [EOS02].	54
Figure 24. Pièce utilisée pour la comparaison des procédés de fabrication rapide [KRU05].....	55
Figure 25. Représentation des surfaces et repérage des surfaces d'une pièce-test [PES06].....	56
Figure 26. Positionnement de 7 pièces sur un plateau de fabrication [PES06].....	56
Figure 27. Variation de la surépaisseur des cylindres en fonction de leur distance au centre [PES06].	57
Figure 28. Exemple de pièce combinant dépôt de poudre et usinage de finition sur une seule machine [KER04].....	58
Figure 29. Concept Multi Component Prototype [RIV07b].	60
Figure 30. Les différents facteurs intervenant dans la complexité [ELM03].	64

Figure 31. La complexité comme relation entre <i>design range</i> et <i>system range</i> [SUH05].	65
Figure 32. Déplacement de l'étendue du système au cours du temps : Complexité dépendante du temps [SUH05].	66
Figure 33. Variations du facteur de faisabilité lors des variations des paramètres constructifs pour une cavité rectangulaire [LES05].	67
Figure 34. Représentation par fonctions et calcul de complexité d'un produit [SAL08].	68
Figure 35. Exemples d'entités d'usinage 5 axes [WAI09].	73
Figure 36. Non unicité de la décomposition en entités [SUH03].	74
Figure 37. Exemple de canaux conformes qui ne sont pas identifiables pour une représentation par entités STEP [SAI07].	75
Figure 38. Tolérance d'approximation (erreur de flèche).	76
Figure 39. Modèle à trois couches du dragon [MAR02].	77
Figure 40. Forme à décomposer.	79
Figure 41. Niveau 0 de la décomposition.	79
Figure 42. Niveau 1 de la décomposition.	80
Figure 43. Algorithme de décomposition quadtree (octree).	81
Figure 44. Niveaux 2, 3 et 4 de la décomposition.	81
Figure 45. Représentation par arbre de la décomposition en quadtree au niveau 2.	82
Figure 46. Pas de balayage constant (à gauche) et variable (à droite) suivant une décomposition de type octree [SRI01].	83
Figure 47. Exemple d'une pièce avec une structure interne de type octree [LAM98].	83
Figure 48. Vue générale de la méthode de fabrication de prototypes à partir d'une décomposition octree [MED06].	83
Figure 49. Algorithme de décomposition octree modifié.	85
Figure 50. Paramètres à prendre en compte pour calculer la complexité de fabrication.	90
Figure 51. Coût relatif lié à la tolérance [ONG03].	91
Figure 52. Valeur normée pour l'indice IMC [KOR05].	93
Figure 53. Procédure générale de calcul des indices.	94
Figure 54. Orientation des axes.	95
Figure 55. Calcul de l'indice $C(d)^-$.	96
Figure 56. Calcul de l'indice $C_i(d_{\min})^+$.	98
Figure 57. OSD dans le cas de l'indice $C_i(d_{\min})^+$.	98
Figure 58. Définition des paramètres morphologiques qui limitent les dimensions de l'outil de coupe.	99
Figure 59. Illustration du calcul de D_{\max} par octants voisins directs et indirects et directions d'ouvertures.	101
Figure 60. Extraction des paramètres morphologiques limitant les dimensions de l'outil de coupe. ...	102
Figure 61. Graphique donnant l'évolution de la valeur de $C_i(f)^-$ en fonction de la valeur de.	103
Figure 62. Calcul de l'indice $C_i(f)^-$.	104
Figure 63. OSD dans le cas de l'indice $C_i(f)^-$.	104
Figure 64. Calcul de l'indice $C(c)^-$.	105
Figure 65. Calcul de l'indice $C(v)^+$.	106
Figure 66. Calcul de l'indice $C_i(h)^+$.	107

Figure 67. Explication des défauts liés à l'éloignement par rapport au centre du plateau de fabrication [PES06].	108
Figure 68. Procédure de calcul $C_i(\rho)^+$.	109
Figure 69. Calcul de l'indice $C_i(m)^-$.	110
Figure 70. Calcul de l'indice $C_i(r)^-$.	110
Figure 71. Données d'entrée et de sortie de la procédure d'analyse de complexité de fabrication.	115
Figure 72. Attributs et méthodes de la classe PIECES.	118
Figure 73. Attributs et méthode de la classe MACHINES.	118
Figure 74. Exemple d'une fiche machine.	120
Figure 75. Attributs de la classe OUTILS.	121
Figure 76. Exemples de fiches outil.	121
Figure 77. Attributs et méthodes de la classe OCTANTS.	122
Figure 78. Calculs des positions et dimensions des octants au niveau 1.	123
Figure 79. Attributs et méthodes de la classe ETUDES.	125
Figure 80. Attributs et méthode de la classe COMPARAISONS.	125
Figure 81. Conventions d'écriture des liaisons entre classes.	126
Figure 82. Représentation par objets du modèle de données.	126
Figure 83. Interface homme-machine pour l'analyse de la complexité de fabrication.	127
Figure 84. Interfaces de calcul des indices de complexité de fabrication.	128
Figure 85. Interface de création du niveau 0 de la décomposition en octree.	128
Figure 86. Interface de comparaisons entre différentes études.	129
Figure 87. Liens entre la maquette informatique et la méthodologie de conception en 6 étapes.	130
Figure 88. Pièce-test utilisée pour le premier exemple.	131
Figure 89*. Résultats pour l'analyse de complexité de fabrication par usinage pour la pièce-test.	132
Figure 90. Décomposition octree de la pièce-test – Représentation des octants gris.	133
Figure 91. Choix du découpage de la pièce-test en deux modules.	135
Figure 92*. Résultats de l'analyse de complexité de fabrication pour les modules.	136
Figure 93. Regroupement des valeurs des indices des modules pour calculer les valeurs totales.	137
Figure 94. Comparaison des analyses de complexité de fabrication pour le premier exemple.	138
Figure 95. Autre exemple de pièce qui peut illustrer les possibilités de la méthodologie pour une approche modulaire mono-procédé.	139
Figure 96. Modèle numérique de la deuxième pièce-test.	140
Figure 97*. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour cette seconde pièce-test.	140
Figure 98. Détail de la décomposition octree de la seconde pièce-test.	141
Figure 99. Possibilité de conception modulaire pour réduire la complexité de fabrication par usinage pour la seconde pièce-test.	142
Figure 100. Exemple de conception en trois modules de la seconde pièce-test.	143
Figure 101*. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la conception modulaire de la seconde pièce-test.	143
Figure 102*. Analyse de complexité de fabrication par ajout de matière pour la seconde pièce-test.	145
Figure 103. Conception modulaire hybride de la seconde pièce-test.	145
Figure 104*. Analyse de complexité de fabrication pour la seconde pièce-test conçue avec l'approche hybride.	146

Figure 105. Comparaison entre les analyses de complexité de fabrication pour la pièce-test monobloc et pour les modules.....	147
Figure 106. Zones incompatibles (arêtes vives) avec un procédé d'usinage.	149
Figure 107. Possibilités de correction pour les zones incompatibles de type arêtes vives.	150
Figure 108. Zones incompatibles (formes intérieures) avec un procédé d'usinage.	151
Figure 109. Possibilités de correction pour les zones incompatibles de types formes intérieures.	151
Figure 110. Noyau pour moule de fonderie cire perdue.....	156
Figure 111. Pièce à réaliser par fonderie.	157
Figure 112. Moule complet.	157
Figure 113. Modèle numérique de la pièce Afoplast étudiée.....	158
Figure 114*. Analyse de complexité de fabrication de la pièce Afoplast monobloc.	158
Figure 115. Conception modulaire de la pièce Afoplast.	159
Figure 116*. Analyse de complexité de fabrication pour la pièce Afoplast modulaire.	160
Figure 117. Comparaison entre les deux analyses pour la pièce Afoplast.	161
Figure 118. Conception des deux modules réalisée par Afoplast.....	162
Figure 119. Exemples de contrôles d'aspect par paluchage.....	163
Figure 120. Présentation de l'outillage PSA étudié.	166
Figure 121. Définitions numériques de l'outillage étudié.....	166
Figure 122*. Analyse de complexité de fabrication pour le poinçon monobloc.	167
Figure 123. Proposition de conception modulaire pour le poinçon.....	168
Figure 124*. Analyses de complexité de fabrication pour les modules composant le poinçon modulaire.....	169
Figure 125. Comparaison des analyses monobloc et modulaire pour le poinçon.	170
Figure 126*. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la matrice monobloc.....	171
Figure 127*. Analyse de complexité de fabrication par ajout de matière pour la matrice monobloc.	173
Figure 128. Conception modulaire hybride de la matrice.	173
Figure 129*. Résultats des analyses de complexité de fabrication pour la conception modulaire hybride de la matrice.	174
Figure 130. Comparaison des analyses de complexité de fabrication pour la matrice conçue avec les approches modulaire et hybride.	175
Tableau 1. Principaux procédés de fabrication par ajout de matière [WHO07] [GUI] [CIR].....	22
Tableau 2. Résultats géométriques pour le frittage laser [KRU05].	55
Tableau 3. Avantages de l'utilisation d'une décomposition octree.	84
Tableau 4. Inconvénients de l'utilisation d'une décomposition octree.	84
Tableau 5. Voisins directs, directions d'ouvertures et voisins indirects pour les octants 18, 23 et 28.	101
Tableau 6. Extraction des paramètres morphologiques limitant les dimensions de l'outil de coupe... ..	103
Tableau 7. Tableau récapitulatif des indices développés.	111
Tableau 8. Tableau récapitulatif des indices effectivement utilisés dans la maquette informatique... ..	114
Tableau 9. Informations pour les 4256, 4258, 4265 et 4267 de la pièce-test.	135
Tableau 10. Extractions des informations morphologiques pour les octants 1376 et 5713.	142
Tableau 11. Regroupement des modules pour la pièce Afoplast modulaire.	161
Tableau 12. Regroupement des modules pour la conception modulaire du poinçon.	170

Glossaire

CAO : Conception Assistée par Ordinateur. Un modèle CAO est un modèle numérique en trois dimensions représentant un objet dans un logiciel de CAO.

Complexité de fabrication : La complexité de fabrication d'une pièce est liée aux paramètres de conception (géométriques, dimensionnels, choix de matériaux, définitions des spécifications) qui en influencent le temps, le coût ou la qualité de réalisation pour un procédé de fabrication donné. Elle est mesurée grâce à des indices de complexité de fabrication calculés à partir de ces paramètres de conception.

CFAO : Conception – Fabrication Assistées par Ordinateur. Voir CAO et FAO.

Décomposition octree : Une octree est une structuration de données, de type arbre, qui partitionne un objet 3D en le subdivisant en cellules élémentaires cubiques ou parallélépipédiques (octants).

DFM : Design For Manufacturing. Les méthodologies de DFM ont pour but de considérer simultanément des objectifs de conception et des contraintes de fabrication. Il s'agit d'identifier et d'éviter des problèmes de fabrication pendant la phase de conception du produit, afin de réduire le délai de développement et d'améliorer la qualité des produits.

Difficulté de fabrication : Voir Complexité de fabrication.

Directions d'ouvertures d'un octant : Une direction (X^+ , X^- , Y^+ , Y^- , Z^+ , Z^-) est dite direction d'ouverture pour un octant si et seulement si cet octant ne possède pas de voisin direct dans cette direction.

DMLS : Direct Metal Laser Sintering (ou frittage laser de poudre métallique). C'est un procédé de fabrication par ajout de matière, utilisant une technologie lit de poudre, et développé par la société allemande EOS. Voir SLS.

Fabrication rapide (ou fabrication additive) : Ensembles de procédés de fabrication ayant comme point commun l'apport itératif de matière (soit point par point, soit couche par couche), par opposition aux techniques d'usinage qui procèdent par enlèvement de matière.

Fabricabilité : Selon le Grand Dictionnaire Terminologique de l'Office québécois de la langue française (www.granddictionnaire.com), il s'agit de « l'aptitude d'un produit à être réalisé facilement, de façon constante et avec une excellente qualité ». Nous utiliserons ce terme principalement dans les deux premiers chapitres, puis nous utiliserons préférentiellement Complexité (ou Difficulté) de fabrication.

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur. La FAO constitue une aide numérique pour la préparation de la fabrication d'une pièce par usinage, et peut également s'étendre à la préparation de la fabrication par d'autres procédés.

Format STL : Format d'échange actuel entre le logiciel de CAO et la machine de fabrication rapide. Il s'agit d'une représentation par triangles des surfaces d'un modèle CAO.

LOM : Laminated Object Manufacturing (ou lamination). Procédé de fabrication rapide, par empilage de couches de matériaux thermocollant automatiquement découpées par un laser de puissance.

MCP : Multi-Component Prototype. Un MCP est un produit ou un outillage prototype composé de plusieurs pièces, dont la définition technique et les performances par rapport aux essais effectués sont représentatives de la définition fonctionnelle monobloc dont elle est issue. Le concept MCP a été à l'origine d'une méthode de conception et de fabrication d'outillages hybrides, développé au sein de notre équipe de recherche.

Prototypage rapide : La notion de prototypage rapide signifie littéralement « fabrication rapide de modèles et prototypes » et désigne différents procédés permettant de restituer physiquement des objets 3D, décrits par leurs données CAO, sans outillage et dans un temps beaucoup plus court que par les techniques classiques. Aujourd'hui, cette définition ne se cantonne plus aux modèles et prototypes, c'est pourquoi nous parlons de Fabrication rapide.

Octants voisins directs : Deux octants (gris ou noirs) sont dits voisins directs si et seulement si ils ont une partie d'une face en commun.

Octants voisins indirects : Deux octants (gris ou noir) sont dits voisins indirects si et seulement si, à partir de l'un, on trouve l'autre en suivant une de ses directions d'ouverture.

OSD : Octants qui doivent être Sous-Décomposés. Ce sont les octants gris pour lesquels un nouveau niveau de la décomposition octree va permettre d'améliorer la précision de l'évaluation locale de la complexité de fabrication.

Outillage : Selon le dictionnaire Petit Larousse, le terme « outillage » renvoie la définition très large suivante : « Ensemble des outils nécessaires à une profession ou à un travail ». En se restreignant au domaine de la transformation de matière, il s'agit alors de pièces permettant la mise en forme de produits.

SLS : Selective Laser Sintering (ou frittage laser sélectif). Procédé de fabrication rapide, selon lequel une poudre est agglomérée par frittage sous l'action d'un laser dont le faisceau est projeté à la surface par un jeu de miroir dynamique. Sur son passage, le laser fond la poudre et seule la région balayée est solidifiée.

Chapitre 1

Contexte général de l'étude

Ce premier chapitre présente le cadre général de nos travaux. Il s'agit de fournir au lecteur une vision du contexte dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse, ainsi qu'une première approche de ce qui a été réalisé.

Pour cela, nous allons présenter rapidement le contexte actuel de la production manufacturière, avec tout d'abord l'évolution du marché de la concurrence internationale puis l'arrivée à maturité de technologies de fabrication récentes, les procédés par ajout de matière.

Dans une seconde partie, nous focaliserons sur le domaine de la fabrication d'outillages pour en dégager les spécificités.

Nous définirons dans une troisième partie le concept d'outillages modulaires hybrides qui permet de réaliser des outillages adaptés aux contraintes industrielles et utilisant au mieux les différents procédés de fabrication (par ajout ou enlèvement de matière). Une méthode de conception de ce type d'outillages, basée sur une analyse de complexité de fabrication, constitue le cœur de ces travaux de thèse, elle est également présentée dans cette troisième partie.

Enfin la quatrième partie annoncera le plan retenu pour la rédaction du présent manuscrit.

1. Contexte général

1.1. Évolution de l'industrie des produits manufacturés

Depuis les années 1970, les évolutions des marchés et de la concurrence internationale entraînent un ensemble d'impératifs pour les entreprises manufacturières. Les produits doivent être conçus et fabriqués à coût minimal et dans des délais toujours plus contraignants. En outre, les clients demandent une qualité optimale et un fort degré de flexibilité. Pour prendre l'exemple de l'industrie automobile, le client d'un véhicule haut de gamme attend une personnalisation du bien qu'il acquiert. Il exprime une vraie attente d'exclusivité, avec des prestations de qualité et des niveaux d'équipements élevés [PSA07], tout en souhaitant disposer de son nouveau véhicule le plus rapidement possible et au moindre coût. C'est ainsi que BMW annonce que la Série 7 se décline en un nombre record de 10¹⁷ alternatives [HU08].

Nous dégageons alors quatre objectifs auxquels tout produit proposé par une entreprise industrielle qui veut être compétitive se doit de répondre : coût – délai – qualité – flexibilité [KER06]. De plus, un cinquième objectif récent vient s'ajouter à la précédente liste. Il s'agit d'un impact environnemental maîtrisé. Cela est déjà le cas pour les matériaux [ASH04], pour certains produits industriels [LOU04], et bien évidemment pour les véhicules, avec des incitations gouvernementales très marquées actuellement (par exemple, la proposition du Parlement européen relative aux véhicules à moteur [COM07]).

Dans ce contexte, il convient pour les concepteurs et les fabricants de produits de bien maîtriser les différentes technologies de fabrication disponibles sur le marché et de connaître leurs possibilités et limites. Dans le paragraphe suivant, nous analysons plus particulièrement les technologies de fabrication par ajout de matière, c'est-à-dire les procédés dits de fabrication rapide.

1.2. Les procédés de fabrication par ajout de matière

1.2.1. Définition

Les procédés de fabrication par ajout de matière ont été utilisés historiquement à des fins de prototypage rapide. La notion de « prototypage rapide » signifie littéralement « fabrication rapide de modèles et prototypes » et désigne différents procédés permettant de restituer physiquement des objets 3D, décrits par leurs données CAO, sans outillage et dans un temps beaucoup plus court que par les techniques classiques [TAI98]. Aujourd'hui, nous étendons cette définition à la notion de « fabrication rapide ». La fabrication se fait par apport itératif de matière (soit point par point, soit couche par couche), par opposition aux techniques d'usinage qui procèdent par enlèvement de matière.

Le point d'entrée d'une fabrication additive est le modèle CAO de la pièce à réaliser. Le format actuel d'échange entre le logiciel de CAO et le directeur de commande de la machine est le format STL. La deuxième phase concerne le choix d'une direction de fabrication puis la création des couches (décomposition du modèle STL en tranches). Enfin, la machine réalise couche après couche le modèle. Une étape de finition est parfois nécessaire pour obtenir le produit final.

Pour ce qui concerne la fabrication rapide de pièces métalliques, nous distinguons deux technologies : par lit de poudre et par projection de poudre. Dans le premier cas de figure, illustré par la Figure 1, une couche de poudre métallique est déposée sur un plateau (étape 1). Puis la source

d'énergie (laser) se déplace et vient lier la poudre métallique (étape 2). Ensuite le plateau descend d'un incrément de hauteur (étape 3), une nouvelle couche est déposée (retour à l'étape 1) et ainsi de suite.

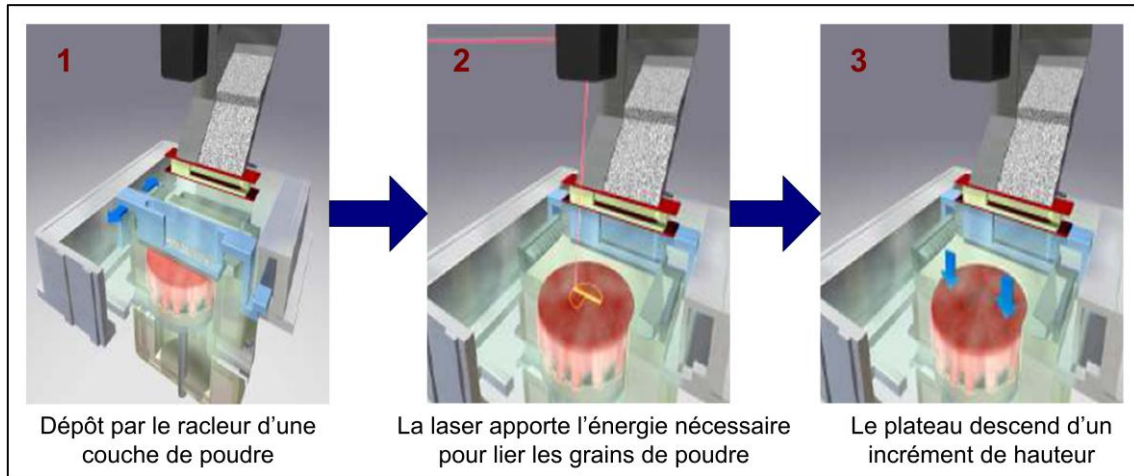


Figure 1. Principe de la fabrication par lit de poudre [NOB05].

Le deuxième cas de figure concerne la technologie par projection de poudre. Dans ce cas, la poudre métallique est directement projetée dans le faisceau du laser (Figure 2). Cette technologie, plus récente, ouvre de nouvelles perspectives, notamment grâce au développement de buses de projection se déplaçant suivant 5 axes ce qui permet aujourd'hui d'améliorer la qualité des pièces produites, la réalisation de voiles minces et de pièces très complexes sans support [LEW00].

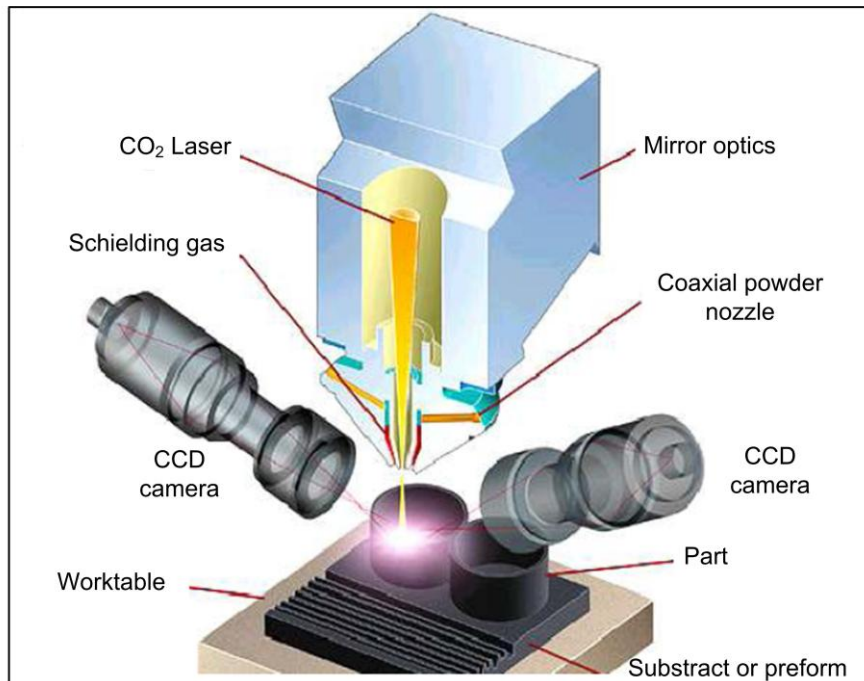


Figure 2. Principe de la fabrication par projection de poudre [NOB05].

1.2.2. Évolutions des techniques de fabrication par ajout de matière

Les origines de ces technologies remontent à la fin du XIX^{ème} siècle, lorsque J.E. Blanthier réalise des cartes topographiques en relief en empilant des plaques de cire les unes sur les autres [BLA98]. Un lissage final élimine l'effet d'escalier dû à l'épaisseur des plaques. Cette technique permet l'obtention directe d'une carte en trois dimensions mais aussi, en réalisant une forme positive et une

forme négative de la carte, l'obtention d'un outillage. Il suffit alors de glisser une feuille entre les deux plaques (qui correspondent alors aux deux matrices d'un outillage) pour réaliser une carte 3D. Par la suite, les améliorations seront apportées au niveau des matériaux (carton en 1940 [PER40], matière plastique en 1964 [ZAN64]). Le procédé de Stratoconception [CIR], créé et breveté par le CIRTES (Centre européen de prototypage et d'outillage rapide), s'inspire directement de ces méthodes. Notons que P. Mognol relevait que l'on retrouve, dès ces premiers travaux, des caractéristiques communes aux procédés actuels de fabrication par ajout de matière [MOG05a] : les limitations dues aux effets de couche, qui font aujourd'hui l'objet d'études au niveau du tranchage [MA04] [TAT98], les recherches sur les matériaux, toujours très abondantes dans la littérature, notamment pour des applications médicales avec des matériaux biocompatibles [FRA08], et l'application à l'obtention d'un outillage, qui nous concerne directement.

Depuis le développement du procédé de Stéréolithographie (1986), de nombreux procédés ont été inventés, certains ont été commercialisés, et quelques uns ont déjà disparu. Le Tableau 1 présente une classification des différentes techniques actuelles de fabrication par ajout de matière.

Nom	Matériau	Principe	Années de développement	Exemple de fabricants de machines
Stéréolithographie (SLA)	Résine époxy ou acrylate	Sous l'action d'un laser, une résine liquide photosensible est polymérisée	1986-1988	3D Systems (USA)
Dépôt de fil fondu (FDM)	ABS, PC	Une buse se déplace en 3 axes et dépose un fil en fusion qui se solidifie au contact de la section précédente	1988-1991	Stratasys (USA)
Lamination (LOM)	Papier, composites	Les couches de matériaux thermocollant découpées par un laser de puissance s'empilent automatiquement	1985-1991	Cubic Technologies (USA)
Stratoconception	Tous les matériaux en plaques usinables	Les couches sont découpées par usinage ou découpe laser à partir de matériaux en plaques puis assemblées	1990-1992	Stratoconcept (France)
Impression 3D (3DP)	Cire, thermoplastiques, métal, céramique, colle	Des gouttes de matériaux sont déposées par une buse, comme une imprimante jet d'encre 2D	1985-1997	Z-Corp (USA)
Frittage laser de poudres (SLS)	Métal, thermoplastiques	Le faisceau émis par le laser est projeté à la surface de la poudre qu'il vient agglomérer	1987-1992	EOS (Allemagne)
Projection de poudre	Acier inox, titane, inconel	Une buse se déplace en 5 axes et vient déposer la poudre métallique, le laser apportant l'énergie nécessaire à la fusion	1998-2003	Optomec (USA)

Tableau 1. Principaux procédés de fabrication par ajout de matière [WHO07] [GUI] [CIR] [VER09].

L'évolution la plus significative de ces dernières années concerne l'amélioration des techniques de projection de poudre métallique, qui permettent un dépôt de métal par une buse se déplaçant en 5 axes. Cette technologie, initialement développée pour faire du rechargement de pièce [BOI07], s'utilise

désormais pour réaliser des pièces complexes en minimisant la quantité de supports nécessaires. De plus, les sources laser sont maintenant assez performantes pour entraîner la fusion de n'importe quelle poudre métallique, l'utilisation d'un liant dans la poudre n'est donc plus nécessaire. Ainsi, nous sommes passés de procédés par fusion partielle (c'est le liant ajouté à la poudre qui est fondu, agglomérant les grains de poudre métallique voisins) à des procédés de fusion complète (les grains de poudre métallique sont directement liés par l'apport d'énergie), permettant ainsi d'avoir des pièces 100 % denses, et ouvrant la voie à des réalisations multimatériaux.

1.2.3. Applications des procédés par ajout de matière

Ces techniques sont particulièrement bien adaptées à la fabrication de pièces unitaires ou de petites séries possédant des formes géométriques complexes. Ainsi, nous retrouvons des applications de ces différentes techniques dans de multiples secteurs (médical, aéronautique, joaillerie d'art, etc). Nous pouvons reprendre ici l'étude réalisée annuellement par T. Wholers [WHO07], constituée, entre autres, d'une analyse complète du marché international de la fabrication par ajout de matière. Les deux figures suivantes sont donc extraites de son *Wholers report 2007* et permettent de dresser un panorama des différents secteurs bénéficiant de produits réalisés par ces techniques additives (Figure 3) et des différentes applications et utilisations de ces produits (Figure 4).

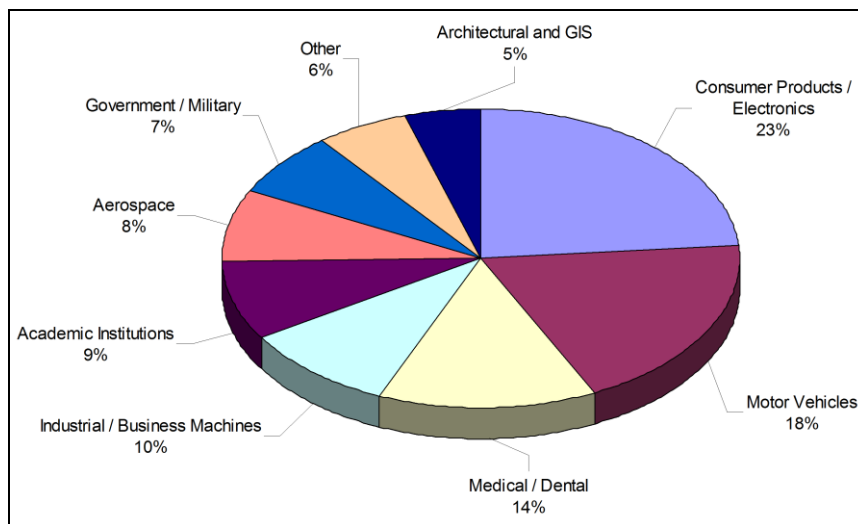


Figure 3. Secteurs utilisant des produits issus des techniques de fabrication additives [WHO07].

On distingue ainsi les secteurs les plus consommateurs de produits réalisés par ajout de matière : les biens d'équipements, l'industrie automobile et le secteur médical. Une étude des données fournies dans les *Wholers report* des 5 années précédentes nous permet de constater très peu d'évolution. En effet, même si la quantité globale de produits issus de ces technologies a considérablement augmentée, la répartition par secteur reste la même.

Concernant l'évolution des applications par rapport aux précédentes années, on note un léger recul de la filière outillage (inserts, modèles pour coulée métallique ou pour outillage prototype), mais ces applications occupent toujours une part importante (environ 25 % depuis cinq années). La plus nette augmentation concerne la fabrication rapide (+ 20 % entre 2006 et 2007, multiplication par 3 depuis 2002). Du fait des progrès intrinsèques des différentes technologies de fabrication par ajout de matière permettant le développement permanent de nouveaux champs d'application industriels, ces techniques

additives ne se cantonnent plus aux seules applications prototypes, mais permettent désormais de réaliser des pièces « bonne matière » et en série.

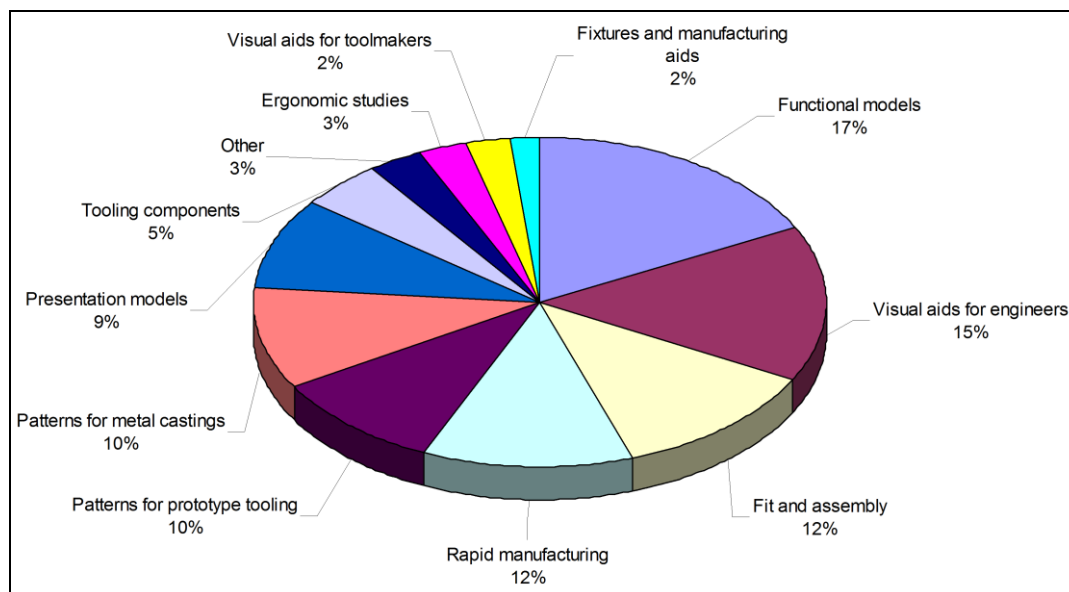


Figure 4. Applications des procédés de fabrication additive [WHO07].

1.2.4. Des procédés qui arrivent à maturité

Les technologies additives ont donc fait des considérables progrès au cours des différentes années, et nous considérons que depuis environ 5 – 10 ans, ces procédés arrivent à maturité. G. Levy analysait en 2003 le cycle de développement de plusieurs technologies (électroérosion à fil, à électrode, usinage grande vitesse, découpe laser, procédés par ajout de matière) [LEV03]. Les analyses des besoins et du marché des procédés par ajout de matière indiquent que nous en sommes à la phase de désillusion (Figure 5), il reste désormais à développer ces procédés pour arriver aux phases de standardisation et d'acceptation.

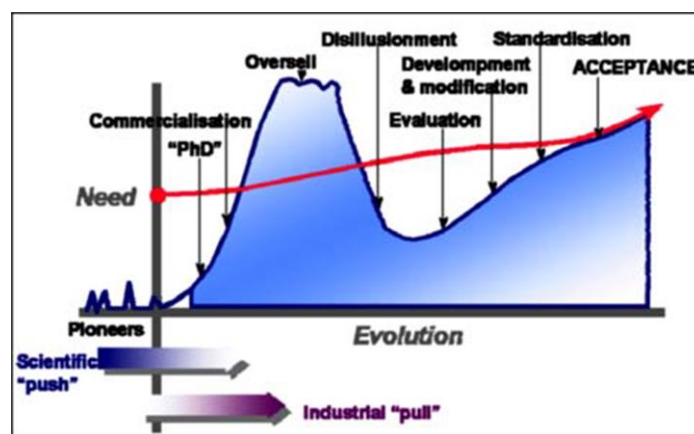


Figure 5. Évolution du cycle de développement d'une technologie [LEV03].

Les progrès techniques les plus significatifs de ces procédés concernent la vitesse de fabrication, la précision dimensionnelle, la qualité des états de surface obtenus, la quantité et les caractéristiques des matériaux compatibles [PAU96]. On a vu apparaître au cours des dernières années des machines capables de réaliser des pièces en multimatériaux [GIB07]. En ce qui concerne la simulation numérique, nous remarquons que ces procédés font désormais l'objet de recherches au niveau de la

simulation de fabrication [CHO04], avec des développements spécifiques pour les pièces multimatériaux [CHE07]. Un autre témoin du développement actuel de ces procédés est la mise en place d'une normalisation concernant les formats d'échange entre la conception et la fabrication des pièces réalisées par des technologies additives. Cette normalisation, constituée par l'intégration des procédés par ajout de matière dans la norme STEP-NC, est pilotée par l'ISO et développée par l'IRCCyN [HAS06a] [HAS06b] [RIV07a] [BON08a].

Pour ce qui est de la réalisation de pièces métalliques, il subsiste encore des verrous qui limitent le développement de la fabrication rapide. En effet, les caractéristiques de qualité géométrique et d'état de surface que l'on peut raisonnablement obtenir avec ces procédés restent encore relativement faibles comparativement à l'usinage [KAR07], et le coût des machines demeure très élevé. Parmi les travaux récents concernant l'analyse des procédés de fabrication par ajout de matière pour des pièces métalliques, nous pouvons citer ceux de l'Université de Missouri – Rolla [RUA06] et ceux de E. Costa Santos [COS06]. Toutes deux fournissent des données intéressantes sur les capacités des différents procédés. D'autres études mettent en avant, par des expérimentations sur des pièces-test, les caractéristiques de précision et d'état de surface des pièces en fonction de la géométrie fabriquée, que celles-ci soient réalisées directement par ajout de matière [KRU05] [RAG07], ou qu'il s'agisse de pièces métalliques obtenues par des moules réalisés avec des techniques de fabrication rapide [HON03]. Au sein de notre équipe de recherche, des études expérimentales ont mis en avant que la précision dimensionnelle dépendait fortement de la géométrie [PES08]. D'autres études ont montré la possibilité de réaliser de pièces de faibles dimensions en alliage de magnésium par fonderie cire perdue à partir de modèles réalisés par technologie lit de poudre [ALL02]. Pour ce qui est de la capacité des procédés lit de poudre, nous pouvons considérer pour le DMLS (Direct Metal Laser Sintering) de la société EOS, une précision de fabrication de 40 à 100 μm , et un état de surface dont la rugosité arithmétique peut atteindre 3 μm (après grenaillage de finition). Au niveau des techniques de projection de poudre, on peut classiquement s'attendre à obtenir des détails jusqu'à la dimension minimale de 0,5 mm, une qualité de fabrication d'environ $\pm 0,125$ mm pour une longueur de 25 mm, et un état de surface caractérisé par une rugosité arithmétique de l'ordre de 5 à 7 μm , selon des données pour le procédé LENS (Laser Engineered Net Shaping) d'Optomec [WHO07].

1.2.5. Synthèse

Pour résumer, bien qu'un haut niveau de qualité soit encore délicat à obtenir, les possibilités de réalisation de formes complexes, très difficiles voire impossibles à usiner par enlèvement de matière, rendent ces procédés très attractifs. Ils offrent ainsi une alternative intéressante à l'usinage dans le cas de pièces de géométries complexes, qui seraient très coûteuses à usiner et gourmandes en temps de fabrication. Ainsi, une combinaison méthodique et raisonnée des procédés de fabrication par ajout et enlèvement de matière permet de réaliser des pièces unitaires métalliques complexes répondant aux objectifs énoncés précédemment (coût – délai – qualité – flexibilité – impact environnemental). Ce type de pièces se retrouve classiquement dans le domaine de la fabrication d'outillages, c'est pourquoi la partie suivante est centrée sur l'étude de ce domaine. La mise en place d'une méthodologie de conception d'outillages fabriqués par une astucieuse combinaison des procédés additifs (fabrication rapide) et soustractifs (usinage) constitue le cœur de ces travaux de thèse.

2. La fabrication d'outillages

2.1. Qu'entendons-nous par « outillages » ?

Selon le dictionnaire Petit Larousse, le terme « outillage » renvoie la définition très large suivante : « Ensemble des outils nécessaires à une profession ou à un travail ». En se restreignant au domaine de la transformation de matière, il s'agit alors de pièces permettant la mise en forme de produits. La fabrication de produits industriels nécessite généralement la réalisation de parties mises en forme par des outillages (moules ou matrices) puis assemblées pour former un produit. Les quatre catégories d'outillages les plus utilisés sont les moules d'injection plastique, les moules de coulée métallique, les matrices de forgeage et les matrices d'emboutissage [ALT01].

Une distinction est couramment faite entre outillage prototype et outillage de série. Un outillage de série devra, dans la plupart des cas, pouvoir assurer la totalité de la production à réaliser avec la cadence et le niveau de qualité imposés, contrairement à un outillage prototype qui sera, quant à lui, destiné à réaliser une seule pièce ou une petite série de pièces dans un but de validation de produit [RIV07b]. Cette distinction était nécessaire dès lors que les procédés d'obtention différaient d'un type d'outillage à l'autre (classiquement : usinage et électroérosion pour l'outillage de série, procédés de prototypage rapide du type SLS pour les outillages prototypes). À partir du moment où les technologies additives deviennent plus compétitives et les séries tendent à diminuer, il nous semble opportun de ne plus distinguer les différents types d'outillages de cette manière.

En ce qui concerne l'outillage rapide, terme généralement utilisé dès lors qu'on associe outillages et procédés par ajout de matière, il s'agit également de préciser le vocabulaire. Selon les Techniques de l'Ingénieur, le principe de l'outillage rapide est la fabrication d'outillages ou de parties d'outillages à l'aide de machines de prototypage rapide [DUB00]. Nous préférons considérer qu'il s'agit de la fabrication d'outillages pour des pièces prototypes, de préséries ou de petites séries. C'est pourquoi l'outillage rapide intervient au niveau des phases de conception et d'industrialisation dans le cycle de développement d'un produit. La création d'outillages pour les prototypes représente l'une des phases les plus consommatrices en temps et en argent, ce qui est particulièrement problématique pour les produits en petites séries et les pièces en grande série qui sont amenées à évoluer rapidement lors de la conception [ROC00]. Il y a une dizaine d'années, G. Taillandier considérait que la filière d'outillage rapide pourrait bien devenir un jour la filière industrielle de fabrication des outillages en série pour l'injection, l'emboutissage, la forge ou la fonderie [TAI98]. C'est bel et bien ce que l'analyse des progrès réalisés par les procédés de fabrication par ajout de matière nous amène à penser. Nous faisons ainsi évoluer la notion d'outillage rapide vers « l'aptitude à réaliser rapidement un outillage, en utilisant de façon raisonnée toutes les technologies disponibles sur le marché et en prenant en compte les différentes phases de vie de l'outillage (conception, fabrication, utilisation, recyclage) » [KER06].

Pour la suite de ce manuscrit, nous utiliserons donc le terme « outillage » pour désigner toute pièce réalisée dans le but de mettre en forme de la matière pour réaliser un produit, sans faire de différences particulières entre moules, matrices, outillages prototypes, outillages de série, outillages rapides, etc.

2.2. La maîtrise de la fabrication des outillages

La qualité des outillages (en termes de précision dimensionnelle et d'état de surface) est un aspect crucial de la chaîne de production, car elle affecte directement la qualité des pièces produites [ALT01]. De même, le coût de production d'un outillage va se répercuter directement sur le coût des pièces qui en sont issues. Ainsi, la maîtrise du coût de réalisation des outillages est un enjeu primordial, surtout lorsque la taille de la série diminue [GIL06]. Le coût d'un outillage est majoritairement lié au coût de fabrication, comme le montre la Figure 6 qui présente, à titre d'exemple, la répartition des coûts sur une gamme d'outils d'emboutissage pour les ouvrants automobiles.

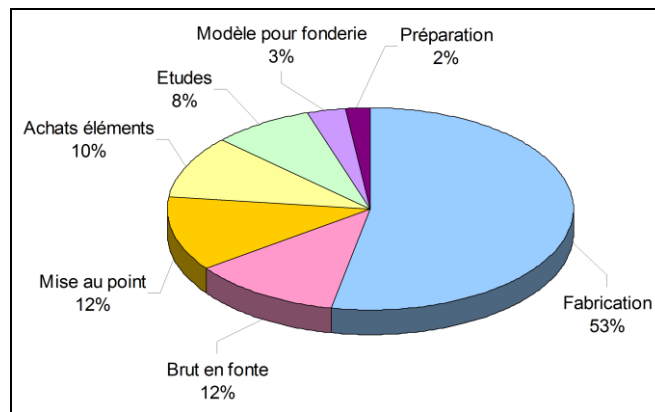


Figure 6. Répartition des coûts d'un outillage d'emboutissage dans le domaine automobile [PSA07].

De plus, l'industrie du travail des métaux a beaucoup évolué ces dernières années, du fait de la concurrence internationale accrue, et du développement de la sous-traitance dans les pays à bas coût de main d'œuvre. Un panorama de l'industrie de l'outillage en Allemagne, au Japon et aux États-Unis a été réalisé par P. Fallböhrer [FAL96], il permet de se rendre compte des évolutions considérables dans le domaine. De même, en France, près de 800 moulistes exerçaient leur profession il y a une dizaine d'années pour un peu plus de 300 aujourd'hui [GUI06]. Il convient donc pour les entreprises qui veulent rester compétitives de bien maîtriser les différents procédés de fabrication adaptés aux spécificités des outillages. Une description de ces procédés est réalisée dans le paragraphe suivant.

2.3. Les spécificités de la fabrication d'outillages et les procédés associés

2.3.1. Quelques caractéristiques spécifiques à la réalisation d'outillage

Les difficultés liées à la réalisation d'un outillage proviennent de ses spécificités : il s'agit de réaliser des formes complexes dans des matériaux aux propriétés mécaniques spécifiques (dureté élevée notamment) et, nous le répétons, en minimisant le temps et le coût de fabrication tout en assurant une précision dimensionnelle et un état de surface compatibles avec la phase de production pour laquelle l'outillage est prévu. À cela s'ajoutent les contraintes d'adaptabilité aux différentes variantes de produits qui prennent une place de plus en plus importante, ainsi que les contraintes d'une fabrication écologiquement propre. Les procédés les plus courants permettant de réaliser des outillages répondant aux objectifs précédents sont l'usinage grande vitesse, l'électroérosion et les procédés de fabrication rapide [JEG03].

2.3.2. L'usinage grande vitesse et l'électroérosion

L'usinage, et particulièrement l'usinage grande vitesse (UGV), permet de réaliser des pièces aux géométries complexes en utilisant des machines multiaxes. Les difficultés liées à la génération de trajectoires d'usinage compatibles avec les formes complexes inhérentes aux outillages sont désormais bien connues (par exemple les travaux du Korea Advanced Institute of Science and Technology [CHO03] [CHO97] [CHO99] [SHI03]), et bon nombre de logiciels de FAO intègrent des stratégies spécifiques à la réalisation de moules et de matrices [FLU01].

Notre équipe de recherche a développé un axe d'investigation autour de l'usinage grande vitesse, en étudiant notamment les machines à structures parallèles qui offrent de nouvelles possibilités de réalisation des surfaces complexes en assurant un niveau de qualité élevé [TER05] [CHA07], en développant des nouvelles stratégies particulièrement adaptées au vidage de poches [RAU07], en travaillant autour de la surveillance de fraisage des pièces complexes [RIT06] ou bien encore en développant une modélisation des défauts de production [TIC04].

Des études de stabilité, menées pour réaliser des pièces aux parois fines (voiles minces) couramment utilisées dans le secteur aéronautique, abondent dans la littérature. Citons par exemple les travaux d'U. Bravo [BRA05] et du Laboratoire Génie de la Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes [WEH08], qui combinent une approche par modélisation numérique à une démarche expérimentale. Les études sur l'usinage de matériaux durs sont également très nombreuses, H. Coldwell développe en ce sens des essais de perçage sur des aciers à 50-60 HRC [COL03].

Les progrès des techniques d'usinage tendent ainsi à limiter fortement l'utilisation de l'électroérosion, pourtant très utilisée jusqu'alors dans le domaine de l'outillage. En effet, plusieurs sources préconisent l'utilisation de l'UGV par rapport à l'électroérosion pour ce qui est de la fabrication d'un outillage. Par exemple, en comparaison avec l'électroérosion, l'UGV permet souvent d'obtenir des outillages dans un délai et à un coût plus faibles [JEG03] [ROD04] [TRA]. À titre d'illustration, la Figure 7 présente la comparaison des procédés de réalisation d'empreinte d'outillages et le gain temporel potentiel lié à l'utilisation de l'usinage grande vitesse.

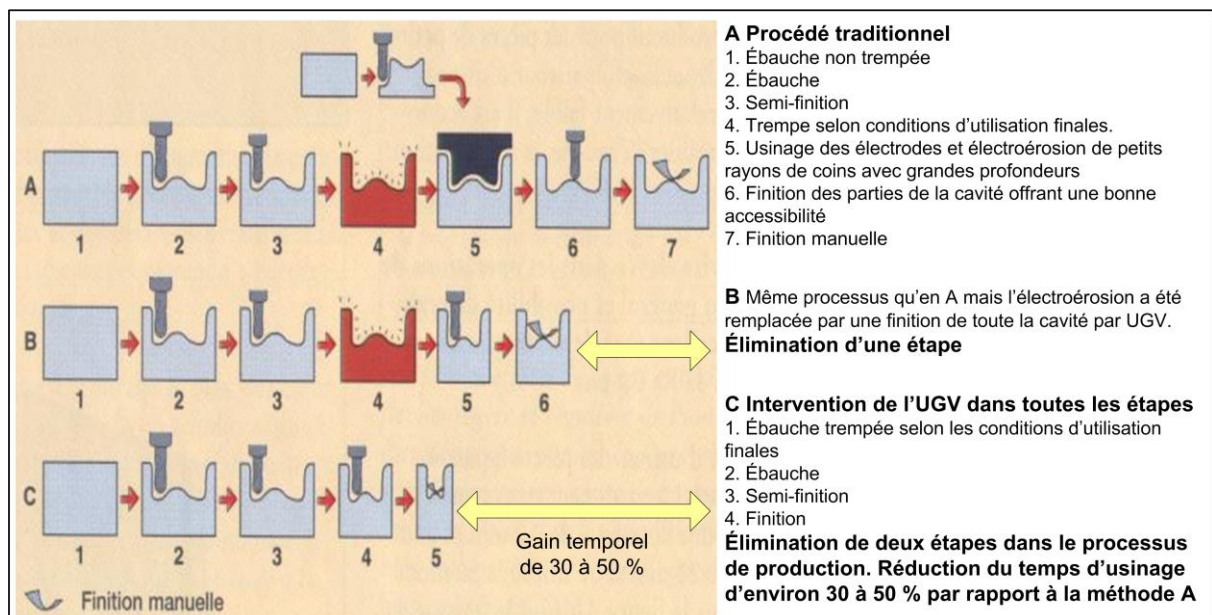


Figure 7. Gamme d'obtention d'une empreinte [JEG03].

De plus, d'un point de vue écologique, l'UGV semble une solution intéressante car c'est une technologie moins consommatrice d'énergie et l'utilisation de lubrifiants de coupe est de plus en plus faible (usinage à sec), par rapport à l'électroérosion pour laquelle il doit y avoir un contrôle constant de l'électrolyte pendant et après le process [KRA04]. Pour la fabrication d'une matrice, l'UGV est reconnu comme étant plus adapté en ébauche, la finition pouvant se faire en électroérosion si les caractéristiques de l'outillage le demandent. Sinon, il convient de réaliser totalement l'outil en UGV [KUZ04]. En effet, l'électroérosion est un procédé coûteux et long (usinage des électrodes) et ne doit être utilisé que si l'usinage grande vitesse n'est pas possible, soit pour des raisons de dureté de matériaux, soit pour des raisons de géométrie de la pièce telles que des faibles rayons pour des surfaces concaves ou des problèmes d'accessibilité d'outil [KER06]. Les procédés par ajout de matière permettent précisément de répondre à ces caractéristiques limites.

2.3.3. Utilisation de procédés par ajout de matière pour réaliser des outillages

Les procédés de fabrication par ajout de matière ont été chronologiquement utilisés pour des applications d'outillages prototypes, de préséries, de petites séries et maintenant pour des outillages de séries plus importantes. Les applications de la fabrication par ajout de matière dans le domaine des outillages sont donc multiples, et se divisent en deux catégories : procédé indirect et procédé direct [DIN04a].

Le procédé indirect consiste à utiliser une technologie de fabrication additive pour réaliser un modèle (par exemple en impression 3D cire ou plastique, par dépôt de fil fondu, etc.). Ce modèle va servir ensuite à la fabrication d'un moule, qui peut être en silicone (surmoulage silicone du modèle plastique) ou en céramique (fonderie cire perdue). Les outillages ainsi créés permettent de réaliser soit une pièce unitaire métallique (cas de la fonderie cire perdue, où le moule céramique est détruit pour dégager la pièce coulée), soit une petite série de pièces plastiques (les moules en silicone peuvent servir une centaine de fois avant de perdre leurs propriétés dimensionnelles).

En ce qui concerne le procédé direct, il s'agit de réaliser les formes positives et négatives de moules ou matrices directement par ajout de matière et d'utiliser cet outillage pour produire une série de pièces. Suivant le matériau utilisé, la série pourra être plus ou moins longue compte tenu de l'usure de l'outillage. Des inserts ont été réalisés par SLS à des fins d'injection plastique de plus de 100 000 pièces [KIN03]. D'autres études cherchent également à démontrer la faisabilité de moules réalisés par SLS pour injecter des pièces en matériaux métalliques non ferreux [PES06]. Pour des applications d'outillages de mise en forme de métaux en feuilles en petite série, T. Nakagawa compare différents procédés de fabrication rapide avec l'usinage [NAK00]. R. Baptista fait de même et étudie par modélisation numérique et expérimentations les comportements d'inserts réalisés par LOM, SLS et UGV [BAP06]. Il est indispensable de comparer ces procédés par ajout de matière avec l'usinage afin de bien situer les plages d'utilisation de chacune des technologies pour une application donnée.

Enfin, nous terminerons par l'un des avantages indéniables des procédés par ajout de matière par rapport à l'usinage : la possibilité de réaliser des canaux de refroidissement conformes. En effet, pour un outillage destiné à recevoir une matière à mettre en forme à l'état liquide (cas de l'injection plastique et de la coulée métallique), il est primordial de bien contrôler le refroidissement de la matière pour qu'il soit homogène [BOI02]. Cela conduit généralement à définir des canaux de refroidissement avec des géométries très complexes, qui sont impossibles à réaliser en usinage par enlèvement de matière, mais qui sont tout à fait compatibles avec des techniques additives. Un exemple est fourni sur

la Figure 8 qui présente la CAO d'un moule de balle de golf dans lequel on distingue les canaux de refroidissement circulaires. Le moule a été réalisé par SLS.

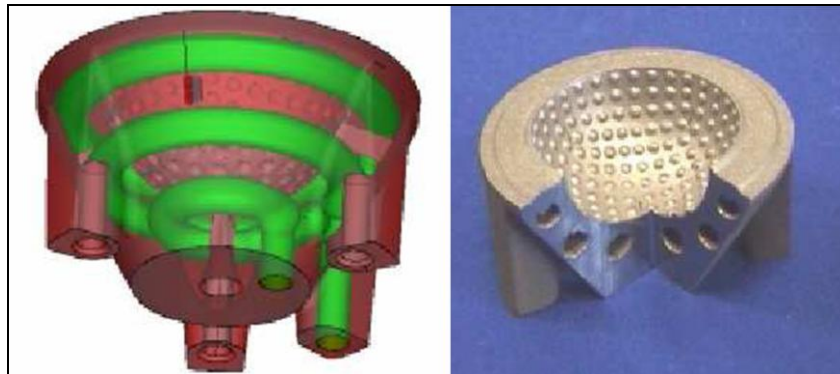


Figure 8. Moule de balle de golf [EOS02].

2.4. Conclusion : de l'utilisation raisonnée et réfléchie des différents procédés de fabrication

En conclusion de cette partie, signalons que les limites des procédés par ajout et enlèvement de matière seront étudiées plus en détail dans le chapitre 3, dans lequel seront définis des indices de complexité de fabrication pour chaque technologie. Nous pouvons déjà retenir que l'usinage grande vitesse est un procédé majoritairement utilisé dans la réalisation d'outillages car les industriels en ont une bonne maîtrise. Cependant, il existe une alternative intéressante avec l'utilisation de procédés par ajout de matière qui permettent de réaliser des formes qui sont trop difficiles (voire impossible) à usiner. Connaissant les spécificités de la fabrication d'outillages (une géométrie complexe, un matériau avec une dureté élevée, une maîtrise indispensable des temps et coûts de fabrication entre autres) et les possibilités technico-économiques des différents procédés de fabrication, nous serons à même de proposer un choix raisonné du meilleur procédé pour chaque outillage, ou pour être plus précis, pour chaque partie d'outillage. En effet, nous allons voir dans la partie suivante que l'outillage ne va plus être considéré comme une entité monobloc, mais qu'il sera analysé en différentes parties.

3. Les outillages modulaires hybrides et leur méthode de conception

3.1. Définition du concept d'outillages modulaires hybrides

3.1.1. Introduction

Afin de proposer des outillages qui répondent aux objectifs évoqués précédemment, nous envisageons de ne plus percevoir l'outillage comme une entité monobloc (c'est-à-dire une seule pièce), mais comme un ensemble de modules. Ce concept a été défini par des travaux antérieurs au sein de l'équipe MO2P au travers des thèses de T. Lesprier [LES05], F. Gillot [GIL06] et M. Rivette [RIV07b]. Nous ferons un état de l'art détaillé de la fabrication modulaire et hybride adaptée au domaine de l'outillage dans le chapitre suivant, mais en guise d'entrée en la matière, nous donnons ici quelques informations permettant au lecteur de comprendre la méthodologie présentée ci-après.

3.1.2. Aspect modulaire

La particularité de la production d'un outillage modulaire repose sur deux contraintes :

- Les nombreuses évolutions géométriques de la pièce à obtenir ;
- Une réalisation plus rapide et moins coûteuse tout en assurant le niveau de qualité désiré.

En effet, dans le contexte actuel de diversification croissante des produits, on observe une multiplication des alternatives de pièces dont certaines consistent simplement en une légère modification géométrique. C'est ainsi que deux modèles de produits peuvent être topologiquement différents dans une zone de dimensions très restreintes par rapport au reste du modèle, comme cela est illustré sur la Figure 9 avec l'exemple de deux modèles de coques de téléphone [KER09a].

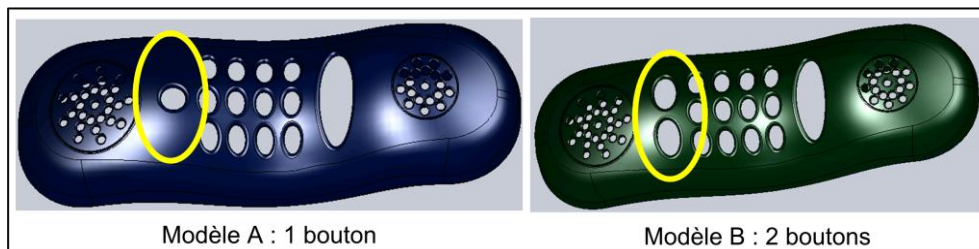


Figure 9. Deux variantes de modèles de produits [KER09a].

Par conséquent, l'outillage de série dédié à la fabrication de ces coques de téléphone en injection plastique pourra avantageusement être conçu et fabriqué de façon modulaire, en changeant seulement un module lorsque le modèle à produire change (Figure 10).

À partir du moment où l'on a constaté la nette diminution de la taille des séries dans l'industrie automobile et le raccourcissement de la durée d'existence d'un modèle de véhicule avant modification (souvent un redesign intervient au bout de seulement 3 années d'existence d'un modèle), on peut logiquement utiliser cette approche modulaire pour concevoir et fabriquer un outillage de série en ayant anticipé les modifications qui interviendront afin de réutiliser la majeure partie de cet outillage et de refabriquer uniquement les modules concernés par l'évolution.

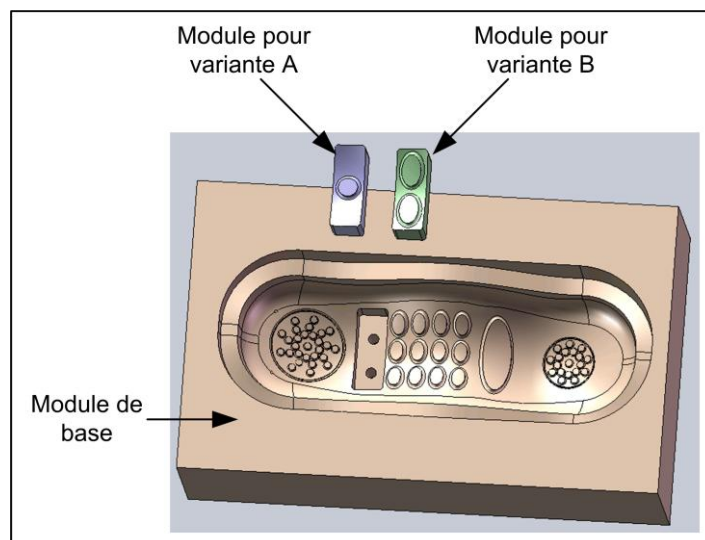


Figure 10. Outillage modulaire pour deux variantes de produits [KER09a].

En outre, lors de la phase de conception d'un produit, l'exploration des solutions doit être la plus exhaustive possible, ce qui crée un antagonisme avec la réduction de la durée du cycle de développement. Les outillages de mise en forme peuvent alors avantageusement être conçus de façon modulaire, ce qui permet de réaliser et tester rapidement les dernières évolutions, réduisant ainsi le temps de développement du produit.

Ainsi, la conception modulaire démontre son potentiel dans le cadre d'une amélioration de la flexibilité. Cependant, il convient de s'assurer que la qualité n'en pâtisse pas et que l'outillage modulaire est capable de produire des pièces avec une précision (dimensionnelle et géométrique) et un état de surface suffisant par rapport à un outillage monobloc.

Il faut également noter qu'une conception modulaire va avoir un impact fort sur le triptyque coût – délai – qualité de fabrication. En effet, nos travaux antérieurs [KER06] ont démontré le gain potentiel en temps de fabrication (donc en coût) et en qualité pour des outillages modulaires réalisés par UGV. Lorsque la fabrication des différents modules peut se faire sur des machines différentes et simultanément, la durée de fabrication des modules se limite à celle du module le plus long à fabriquer. Lorsque l'usinage de l'outillage monobloc impose d'utiliser des outils de coupe longs et de faibles diamètres, on peut avoir des défauts de qualité des surfaces usinées (liés à des phénomènes de vibration et de flexion d'outil). Aussi, il peut être préférable de décomposer l'outillage en différents modules, simples à usiner et ne nécessitant plus ces outils peu rigides.

L'idée est donc de concevoir l'outillage non plus de façon monobloc, mais comme un puzzle en trois dimensions. En cas de modifications locales (variante de produit, légère évolution du design, tests lors de la phase de développement, etc.), il suffit de produire de nouveau seulement le module qui a évolué. Et cela permet d'améliorer la fabricabilité de l'outillage, en diminuant les temps et coûts de fabrication ou en facilitant la réalisation à un haut niveau de qualité.

3.1.3. Aspect hybride

À la suite de cet aspect modulaire, nous envisageons le point de vue hybride, qui consiste à décomposer l'outillage en modules qui vont être réalisés par des procédés de fabrication différents. La comparaison se fait entre les procédés par enlèvement de matière (dont l'usinage grande vitesse fait partie) et les procédés par ajout de matière. L'objectif est donc d'utiliser chaque procédé à bon escient.

C'est-à-dire que les zones de l'outillage qui nécessitent (pour des raisons de coût ou de qualité) l'utilisation d'un procédé par enlèvement de matière vont constituer un module qui sera usiné, et les zones pour lesquelles un procédé additif est plus favorable vont constituer un module réalisé par ajout de matière. Ce choix s'appuie sur une bonne connaissance des limites technico-économiques de chacun des procédés.

Notons que les développements des technologies de fabrication métallique par projection de poudre permettent désormais d'envisager de déposer de la poudre sur une préforme « quelconque », contrairement aux procédés par lit de poudre qui nécessitent l'utilisation d'un support duquel il faut détacher la pièce fabriquée. Ainsi, nous pouvons imaginer la réalisation des zones trop complexes à usiner par dépôt de poudre métallique sur la base de la pièce usinée, nous nous affranchirons alors de contraintes liées aux assemblages des modules entre eux.

3.1.4. L'outillage modulaire hybride

En conclusion, nous définissons l'outillage modulaire hybride comme un outillage pour lequel les applications des points de vue modulaire et hybride exposés ci-dessus permettent de concevoir et fabriquer un outillage dont les caractéristiques en termes de coût – délai – qualité – flexibilité sont améliorées par rapport à une conception monobloc. À ce stade de la définition de la situation générale de l'étude, nous laissons volontairement de côté la cinquième contrainte précédemment définie (impact environnemental), mais des analyses de consommation énergétique et de matière première des différents procédés de fabrication rapide, visant à définir leur impact environnemental ont été menées au sein de notre équipe de recherche par D. Le Picart [LEP03] [MOG06a] [MOG05b].

Nos travaux visent donc à mettre en place une méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides, cette méthode est présentée dans le paragraphe suivant.

3.2. Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides

L'objectif général de la méthode est donc de connaître les caractéristiques coût – délai – qualité – flexibilité de l'outillage monobloc, puis de proposer un découpage modulaire hybride permettant d'améliorer significativement ces caractéristiques. Nous verrons par la suite que nous nous focalisons sur les trois premières composantes, que nous regroupons sous l'appellation générique de complexité de fabrication.

Nous avons donc développée une méthodologie en 6 étapes, présentée sur la Figure 11 [KER09b]. Le point de départ de la méthodologie est le modèle CAO de l'outillage à analyser, dans sa forme monobloc traditionnelle (étape 1). À partir de ce fichier CAO, une première analyse de la complexité de fabrication est effectuée (étape 2). Puis l'application simultanée des points de vue modulaires et hybrides (étape 3) permet la création d'un modèle CAO de l'outillage modulaire hybride (étape 4). Sur ce nouveau modèle CAO est effectuée une analyse de complexité de fabrication (étape 5) en utilisant les mêmes procédures qu'à l'étape 2. Puis la dernière étape concerne la comparaison des deux analyses de complexités de fabrication dans le but de quantifier le gain apporté par la conception modulaire hybride, représenté par la réduction de la complexité de fabrication.

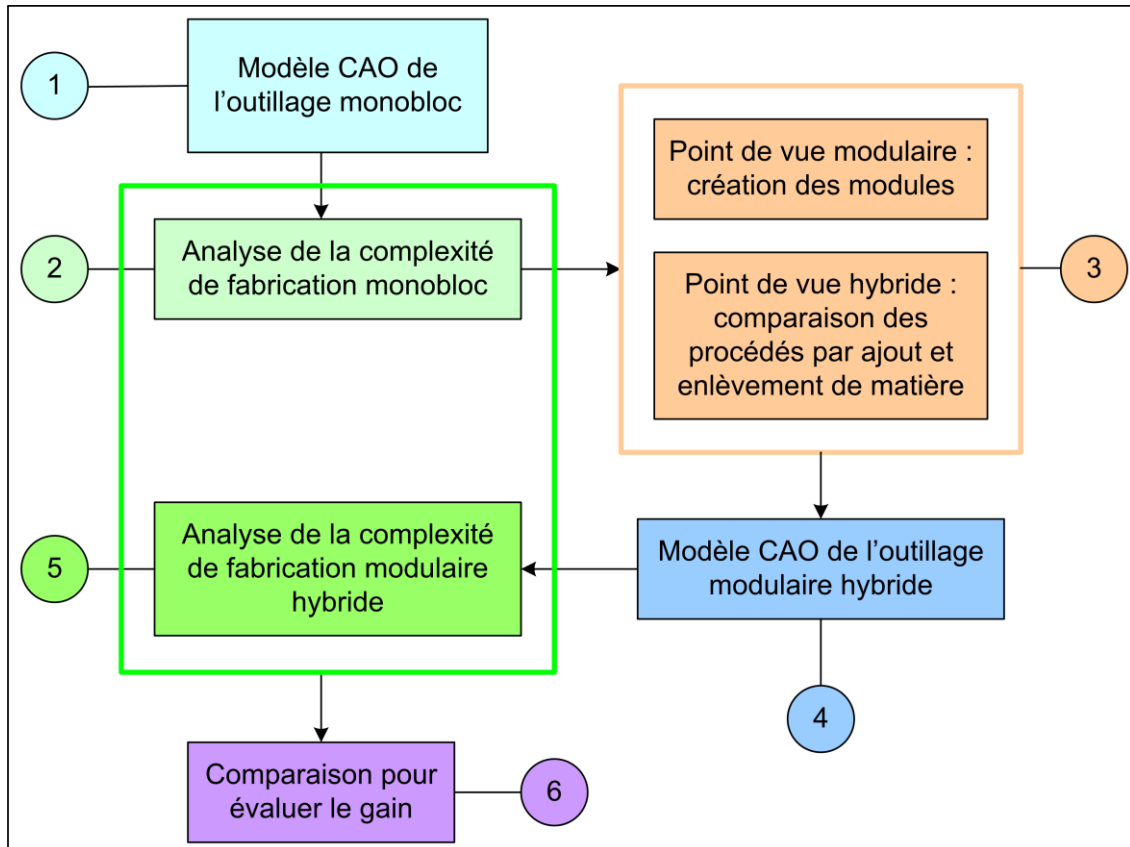


Figure 11. Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides en 6 étapes [KER09b].

4. Synthèse sur la situation générale de l'étude et plan du manuscrit

Dans ce chapitre, nous avons cherché à placer nos travaux dans un contexte global, lié à l'évolution conjointe des industries de produits manufacturés et des technologies de fabrication. Il en résulte que les contraintes à respecter pour qu'un produit soit compétitif sont de cinq ordres :

- Une minimisation des coûts ;
- Une réduction des délais de développement et de fabrication ;
- Un haut niveau de qualité ;
- Une flexibilité accrue pour satisfaire les objectifs de personnalisation ;
- Une maîtrise de l'impact environnemental.

Les progrès des procédés de fabrication par ajout de matière permettent aujourd'hui d'entrevoir les techniques additives comme capables de réaliser des pièces métalliques de formes complexes, constituant ainsi une alternative attirante à l'usinage grande vitesse. Il est alors intéressant de combiner ces technologies de manière raisonnée afin de proposer des produits répondant aux contraintes précisées ci-dessus.

Notre champ d'investigation concerne la fabrication d'outillages. Cela est justifié par le fait que la production de moules et de matrices constitue un domaine dans lequel l'application de la combinaison des procédés par ajout et enlèvement de matière présente un intérêt certain.

Forts de ces constats, nous proposons une nouvelle méthodologie de conception d'outillages, en intégrant les aspects modulaires et hybrides. Nous allons développer et justifier les différents points de cette méthodologie dans les chapitres suivants.

Ainsi, le **deuxième chapitre** traitera de l'état de l'art en matière de conception d'outillages, d'intégration des contraintes de fabrication dans la phase de conception, et fournira des éléments clés pour le développement des aspects modulaires et hybrides. Ce chapitre nous permettra donc de mettre en avant la nécessité de développer une nouvelle méthode de conception d'outillages.

Ensuite, dans le **troisième chapitre**, nous développerons concrètement l'analyse de fabricabilité des outillages, qui est la pierre angulaire de notre méthode. Nous verrons l'importance de bien définir les données d'entrée de cette analyse, et définirons concrètement les indices de fabricabilité qui permettent de faire des choix entre les différents procédés.

Le **quatrième chapitre** sera constitué par la mise en place du formalisme de la méthodologie, grâce au développement d'un modèle de données et d'une maquette informatique implémentée directement dans le logiciel de CAO SolidWorks. Cela permettra de tester la méthode sur différentes pièces-test simples afin de mettre en avant ses multiples possibilités d'utilisation. Nous en présenterons également ses limites, et les pistes d'évolutions.

Cette méthodologie a été appliquée dans un contexte industriel. En effet, l'implication de notre équipe de recherche dans le projet EMOA (Excellence dans la Maîtrise de l'Ouvrant Automobile), porté par PSA Peugeot-Citroën et labellisé par le pôle de compétitivité IDforCAR, nous a permis

d'appliquer notre méthode de conception d'outillages modulaires hybrides dans le cadre de la réalisation d'une matrice et d'un poinçon d'emboutissage. Nous avons également utilisé notre approche à un autre type d'outillage industriel, un noyau pour un moule d'injection plastique, en partenariat avec la société Afoplast, une PME spécialisée dans la conception – fabrication de moules d'injection. Les résultats de ces études sont présentés dans le **cinquième chapitre**.

Enfin, le **sixième chapitre** présente les conclusions de l'ensemble de ces travaux, et les perspectives qui en découlent.

Chapitre 2

État de l'art et problématique

Ce chapitre a pour objectif d'exposer la problématique de nos travaux de thèse. Nous avons déjà mis en avant, au cours du chapitre précédent, l'importance de fabriquer des outillages intégrant au mieux les différents procédés de fabrication disponibles sur le marché et permettant d'avoir un haut niveau de flexibilité. Nous devons désormais analyser ce qui existe déjà dans le domaine de la conception d'outillages et dans l'application des points de vue modulaires et hybrides afin de comprendre les verrous qu'il reste à lever.

Ainsi nous allons présenter dans une première partie une analyse des systèmes d'aide à la conception d'outillages. Nous verrons qu'une très large majorité de ces systèmes est liée à l'analyse du comportement de celui-ci pendant la phase de mise en forme des pièces, mais que très peu intègrent des contraintes liées à la fabrication de l'outillage proprement dit.

En revanche, le développement du Design For Manufacturing permet de prendre en compte dès la phase de conception un certain nombre de contraintes de fabrication, mais les applications au domaine de l'outillage restent très marginales. C'est ce que nous exposerons dans la seconde partie.

La troisième partie est consacrée à l'approche modulaire. Notre analyse portera sur la connaissance des avantages et des limites d'une telle approche, et mettra en avant la possibilité d'intégration de cette approche dans une optique de conception d'outillages.

Dans la quatrième partie, nous ferons le point sur les approches hybrides, c'est-à-dire la combinaison des procédés par ajout et enlèvement de matière.

La cinquième partie présentera la méthodologie de conception et de fabrication d'outillages précédemment proposée par notre équipe de recherche au travers du concept MCP (Multi-Component Prototype). Nous en révélerons quelques limites dans sa mise en œuvre, afin de définir clairement dans la sixième partie la problématique auquel le présent travail de thèse se propose de répondre.

1. Méthode de conception d'outillages

1.1. Rapide historique

L'une des tâches parmi les plus complexes dans le développement de produits est sans nul doute la conception des outillages. C'est pourquoi de nombreuses méthodes d'aide ont été fournies aux concepteurs d'outillages afin que ceux-ci puissent réaliser des moules et des matrices à moindre coût et permettant de réaliser des pièces avec une qualité accrue. B.T. Cheok a rédigé une classification des méthodes d'automatisation de la conception d'outillages pour le forgeage [CHE98]. Nous en reprenons quelques éléments dans le paragraphe suivant afin de dresser un rapide historique des méthodes de conception d'outillages.

Le développement de ces méthodes a été considérable au Japon, dès le milieu des années 1970, en liaison avec l'explosion du nombre de systèmes électroniques et leurs boîtiers emboutis. Ainsi des sociétés comme Hitachi ou Nippon Electric ont développé leurs propres systèmes de conception et de fabrication assistées par ordinateur pour leurs outillages de presse. L'objectif était alors de réduire le temps de conception d'une matrice de 20 à 5 jours. Puis, dans le milieu des années 1980, la multiplication des systèmes de CFAO, associés à des langages de programmation tel Fortran, a permis d'intégrer des calculs d'efforts, de déformation et de faciliter ainsi le choix des dimensions des composants des outillages. À la fin des années 1980 et au début des années 1990, un nouvel élan est fourni à ces systèmes de conception automatique d'outillages grâce à l'application des techniques d'intelligence artificielle. De façon générale, les systèmes d'aides à la conception modélisent les connaissances empiriques des experts et dépendent donc fortement du domaine considéré. Ainsi, les systèmes diffèrent qu'il s'agisse par exemple de matriçage [JOL03], d'emboutissage de pièces de révolution [ESC96] ou d'extrusion [GOR07].

1.2. À quoi servent les différentes méthodes d'aide à la conception d'outillages ?

Si les méthodes d'aide à la conception d'outillages sont différentes suivant le domaine d'utilisation, elles ont toutes globalement le même objectif : fournir au concepteur des pistes pour que les outillages soient performants lors de la mise en forme de pièces.

Par exemple, T. Pepelnjak propose un système d'optimisation de géométrie pour des outillages réalisés par assemblages de couches de différentes épaisseurs (de façon similaire à de la Stratoconception) en étudiant la déformation des couches lors de l'emboutissage profond de cuvettes [PEP98]. C. Hindman propose quant à lui d'optimiser la géométrie de l'outillage au regard des écarts dimensionnels entre la pièce emboutie et celle désirée par une boucle d'asservissement [HIN00]. Toujours pour ce qui concerne l'emboutissage, nous pouvons citer le système Pro_Deep [PAR98], développé par la l'université de Pusan, en République de Corée. Le point de départ est un fichier numérique de la pièce à obtenir par emboutissage. La première étape consiste à décomposer la pièce en entités reconnaissables, la seconde étape concerne l'application de règles de conception de l'outillage implémentées dans le système. Ces règles vont permettre de définir des rayons de poinçon et de matrice pour éviter le déchirement de la tôle. Notons que là encore, cette méthode n'est valable que pour un domaine précis puisque la banque de données des entités utiles à la décomposition de la

pièce n'est composée que d'entités d'emboutissage. W. Sosnowski cherche à optimiser la forme des outillages d'emboutissage grâce à une analyse de sensibilité sur les paramètres de conception [SOS02]. Dans le domaine du matriçage de cuivre, M. Jolgaf développe des simulations numériques des contraintes et déplacements lors de la mise en forme afin de concevoir l'outillage avec le minimum de matière tout en résistant aux efforts lors du forgeage [JOL03]. Dernier exemple, dans le domaine de l'extrusion, W.A. Gordon se base sur des calculs de champs de vitesse de déformation plastique afin d'adapter la forme de la matrice pour minimiser les déformations [GOR07].

Les exemples pourraient être plus nombreux. Ce que nous en retenons, c'est que, dans tous les cas, les méthodes ont pour objectif l'optimisation de l'outillage vis-à-vis de son comportement pendant la phase d'utilisation (c'est-à-dire la mise en forme de pièces). Or la tendance est à la prise en compte du cycle de vie complet d'un produit dès la conception, c'est-à-dire qu'il ne suffit pas de concevoir un produit pour qu'il réponde à des besoins d'utilisation, mais il devient nécessaire d'intégrer dès la conception des contraintes liées à la fabrication, l'assemblage, la maintenance, la fin de vie [MA08].

1.3. Prise en compte de la fabrication de l'outillage dans la conception de produit

Nous avons montré dans le premier chapitre l'importance de la part prise par la fabrication d'un outillage dans le coût total de celui-ci (Figure 6). Nous savons également que 70 % du coût d'un produit sont définis par les choix des acteurs de la conception [SHE01]. Dès lors, il devient primordial que la fabrication soit optimisée dès la conception. Cela implique une très bonne connaissance des différentes technologies de fabrication de la part des concepteurs. Or une étude a montré, à partir d'une enquête réalisée en Grande-Bretagne, le degré de connaissances moyen des concepteurs en ce qui concerne les procédés de fabrication [HOW03] (Figure 12).

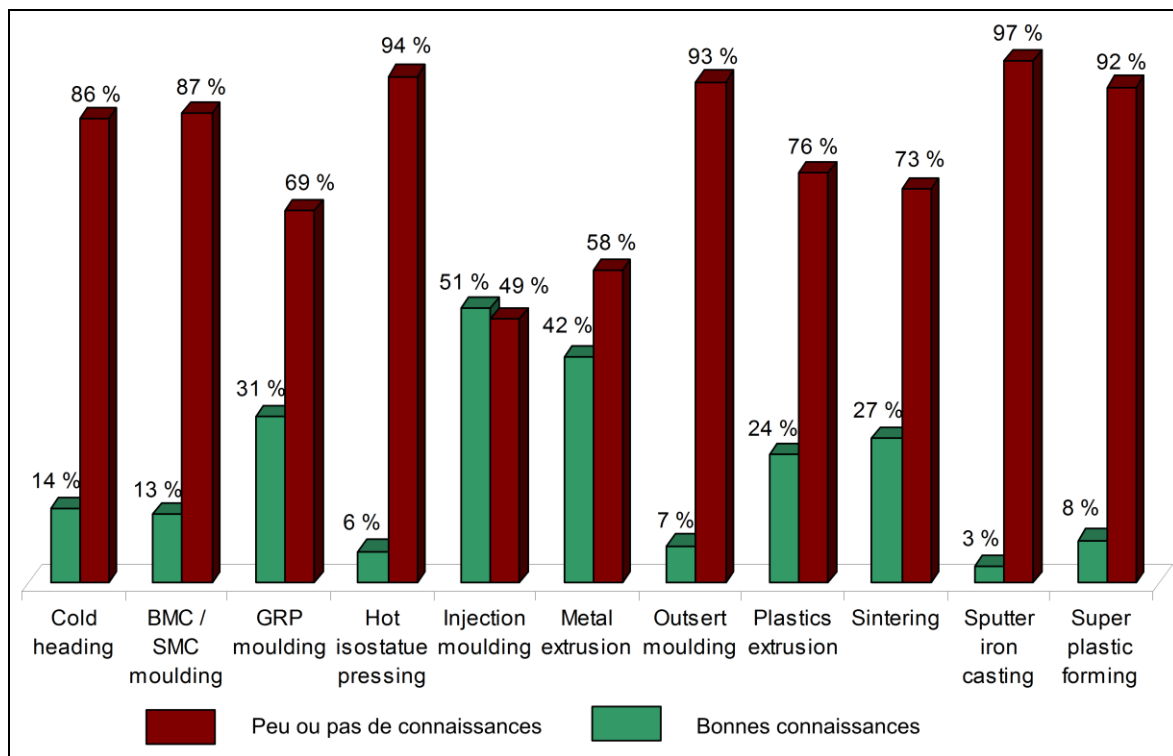


Figure 12. Connaissances des concepteurs en procédés de fabrication [HOW03].

Bien sûr, il serait délicat d'en tirer des conclusions générales, d'autant plus que l'étude date d'une quinzaine d'années, mais cela souligne bien l'attente des concepteurs vis-à-vis de modélisation des connaissances des technologies de fabrication.

D'autres études témoignent de l'insuffisante prise en compte de la fabrication dans la phase de développement d'un outillage. Citons notamment les analyses du GERPISA (Groupe d'Études et de Recherches Permanent sur l'Industrie et les Salariés de l'Automobile) qui montrent que les ateliers d'usinage des moules influencent très peu les phases amont de spécification et conception des moules, alors que leurs interventions déterminent le délai de fabrication des moules [URS03]. Il devient alors nécessaire de mieux prendre en compte la fabrication de l'outillage dès sa phase de conception.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de méthodes d'aide à la conception d'outillages qui prennent en compte non pas le comportement des outillages dans leur phase d'utilisation (la mise en forme de pièces), mais leur facilité à être fabriqués. On peut en revanche trouver dans la littérature des systèmes permettant d'optimiser la fabrication d'un moule ou d'une matrice. C'est le cas, par exemple, d'un système expert de définition de parcours d'outils et de conditions de coupe optimisés [CAK05]. Les données d'entrée sont le matériau, le type d'application (ébauche, semi-finition, finition), le matériau de l'outil ainsi que la typologie des surfaces à usiner (planes, cylindriques, courbes). Un ensemble de règles « Si... Alors... » permet de définir des recommandations concernant le type d'outils de coupe, la stratégie d'usinage, la direction d'avance, etc. R.S. Lee propose une représentation par objets des différentes entités composant un moule et une structuration des connaissances nécessaires à l'obtention d'une gamme de fabrication complète [LEE98]. Bien que ces études soient intéressantes pour définir automatiquement des conditions de fabrication optimisées pour réaliser des outillages, elles ne paraissent pas réellement adaptées aux spécificités du domaine. En effet, elles nécessitent comme point de départ une définition en entités de l'outillage, or ces entités sont de type relativement simples (planes, cylindriques, etc.) et ne reflètent que modestement l'étendue des formes complexes couramment utilisées dans la définition d'outillages de mise en forme. Ainsi, nous considérons que ces études ne sont qu'une première approche dans l'intégration de contraintes de fabrication dans la conception d'outillages.

Une autre contrainte de la fabrication d'outillages concerne la maîtrise de l'état de surface, puisque la rugosité des outillages a une répercussion directe sur la qualité des pièces produites et sur les temps de finition et de mise au point. Dans ce domaine, les travaux mettent l'accent sur le choix de stratégies d'usinage dans le but d'obtenir une qualité de surface excellente pour des durées de programmation et de fabrication restreintes [SCH06]. Les recherches sont principalement empiriques, basées sur des usinages de pièces-test et des mesures d'état de surface afin d'en dégager des modèles [VIV04]. Le problème est qu'il n'y a pas de retour possible vis-à-vis de la conception, celle-ci étant figée.

Pour étudier des systèmes d'aide à la conception d'outillages qui intègrent des contraintes liées à leur fabrication, il est nécessaire d'élargir un peu le champ d'investigation et d'analyser le domaine du Design For Manufacturing, dans lequel nous allons trouver différentes méthodes de prise en compte des difficultés de fabrication lors de la phase de conception des produits.

2. Design For Manufacturing

2.1. Définition et historique

Les méthodologies de Design For Manufacturing (DFM) ont pour but de considérer simultanément des objectifs de conception et des contraintes de fabrication. Il s'agit d'identifier et d'éviter des problèmes de fabrication pendant la phase de conception du produit, afin de réduire le délai de développement et d'améliorer la qualité des produits [GUP97].

Les racines du DFM remontent à la seconde guerre mondiale, lorsque la pression politique sur la mise au point rapide d'armes a imposé une intégration forte entre conception et fabrication. Puis l'ère de prospérité industrielle a de nouveau séparé les départements de conception et de fabrication, le résultat fut un environnement de développement de produits séquentiel, d'où peu d'attention pour le concept du DFM. À la fin des années 1970, l'essor de la compétition internationale et l'objectif de réduction des délais ont fait resurgir le DFM, avec l'intégration d'ingénieurs de la fabrication dans l'équipe de conception. Sont alors apparues des règles de conception pour améliorer la fabricabilité. Enfin, avec l'avènement de la CAO, les méthodologies actuelles de DFM consistent à intégrer des modules d'estimation des coûts, des délais et de la qualité de fabrication des produits lors de leur phase de conception.

Ainsi, nous allons étudier de plus près les principales méthodes de DFM afin d'en analyser les grandes lignes et d'en comprendre les caractéristiques.

2.2. Analyses des méthodes de DFM

En nous appuyant sur les travaux de S.K. Gupta [GUP95] [DAS96] [GUP97] [HUA03] [PRI04] et ceux de C. Roberts [STA99] [ROB97] [WAN07], nous classifions les différentes méthodes de DFM selon trois aspects : le type d'approche, la mesure de la fabricabilité et l'interaction concepteur / système.

2.2.1. Le type d'approche

On distingue classiquement deux types d'approche : directe et indirecte.

Dans le cas de l'approche directe, des règles sont appliquées pour identifier les paramètres de conception qui vont générer des portions de pièces réputées impossibles ou trop difficiles à fabriquer. Pour cela, il est nécessaire de se baser sur une définition géométrique précise de la pièce à étudier. Dans les travaux de L. Sabourin, les règles sont exprimées sous forme de « cartes de savoir-faire métier » élaborées à partir de plans d'expériences [SAB02].

En ce qui concerne l'approche indirecte, l'idée est de définir une gamme de fabrication, puis d'en modifier une partie dans le but de réduire le coût ou le temps de fabrication [GUP95]. Cette approche est plus simple à mettre en œuvre, mais elle comporte un désagrément majeur, induit par le fait qu'il faille, au préalable, proposer une gamme de fabrication, ce qui devient alors peu enthousiasmant lorsqu'on s'intéresse au développement d'une méthodologie appuyée principalement sur la conception.

2.2.2. La mesure de la fabricabilité

Il existe plusieurs échelles de mesure pour évaluer la fabricabilité. Elles sont parfois combinées entre elles dans les systèmes de DFM.

La mesure binaire est l'échelle de mesure la plus simple. Cela revient à discriminer les conceptions qui sont technico-économiquement trop difficiles à fabriquer. Cette mesure peut s'effectuer en appliquant des règles de non-validité d'un procédé, qui sont souvent des limites de possibilités en termes de géométrie, de dimensions, de qualité, etc qui s'appliquent aux différentes entités composant la pièce à analyser [SAN97] [MOL08].

La mesure qualitative consiste à associer aux conceptions des adjectifs caractérisant la fabricabilité, du type : « difficile », « moyennement difficile », « moyennement facile », « facile », etc (*good*, *bad* ou *marginal* dans le livre de J.J. Shah [SHA95]). Ces mesures sont souvent complexes à interpréter, et il devient quasiment impossible de comparer et de combiner différentes mesures élaborées pour différents types de pièces.

La mesure quantitative permet d'évaluer une conception en calculant une valeur numérique de fabricabilité. Ce type d'échelle quantitative comprend également les inconvénients de l'échelle qualitative (complexité de mise en œuvre, difficulté de combinaison) mais dans le cas où l'échelle de valeurs est normée avec, par exemple, des valeurs entre 0 et 1 comme c'est le cas dans les travaux de S.K. Ong [ONG03], la comparaison devient plus aisée.

La mesure directe revient à associer à une conception une évaluation du temps ou du coût de fabrication. Ces mesures ont été allègrement employées car elles ont l'avantage de fournir au concepteur une image directe des difficultés de fabrication, il est alors possible de modifier la conception dans le but d'atteindre un objectif chiffré (par exemple, réduction de 15 % du coût de fabrication). En revanche, le problème posé devient l'évaluation des temps de fabrication, qui est particulièrement complexe compte tenu des écarts observés entre une durée de fabrication fournie par un modèle et la durée réellement nécessaire à la réalisation. Ces écarts ont été mis en évidence dans plusieurs travaux ([HEO06] [MAR00a] [SCH06], ou les études de C.A. Rodriguez [SIL06] [MON03]). Les modèles d'estimation des coûts de fabrication d'un outillage par enlèvement de matière se sont multipliés [KAM96] [GAY99] [BOU04] [CHA03a] [CHE99], mais il subsiste des difficultés relatives à la quantité de coûts à intégrer et à calculer (coûts directs et indirects, coûts de la matière et de la main d'œuvre, frais généraux, etc) [HMI06] [SHE01] [GEI96] [FEN96a].

2.2.3. L'interaction utilisateur / système

Cette dernière caractéristique précise l'interaction entre le concepteur et le système, c'est-à-dire le genre d'informations composant les données d'entrée renseignées par l'utilisateur et les données de sortie fournies en retour.

Pour ce qui est des données d'entrée, nous remarquons que, dans certains cas, le concepteur doit fournir une représentation par entités de la pièce, basée sur une banque de données d'entités. Des systèmes plus sophistiqués acceptent directement une définition numérique de la pièce, et si nécessaire, la représentation par entités est générée automatiquement. Il peut subsister des ambiguïtés entre la pièce conçue avec un logiciel de CAO et sa représentation en entités utilisée par le système, car les formats d'échange dits « neutres » (iges, step, etc) fournissent parfois des représentations de la pièce qui ne sont pas exemptes de défauts, notamment pour ce qui est des surfaces complexes. Dans ce cas, il peut être intéressant de développer le système directement dans le logiciel de CAO pour assurer

une parfaite compatibilité [CUL07]. Il existe également des études dans lesquelles les données d'entrée peuvent être un simple nuage de points, obtenu par le balayage de la pièce par un laser ou des mesures sur machines à mesurer tridimensionnelles [CHA01]. Enfin, d'autres travaux moins nombreux utilisent comme données d'entrée des représentations par graphes de la pièce [MUK97].

En ce qui concerne les types d'informations fournies en retour, la plupart des systèmes d'analyse de fabricabilité donnent une évaluation de la fabricabilité dépendant de la mesure effectuée (et définie au paragraphe précédent). Il s'agit dans ces cas-là d'analyses globales de la pièce. De plus, certains systèmes vont décomposer la pièce (par exemple en entités) et renvoyer différentes valeurs de fabricabilité pour les différentes zones de la pièce. On parle alors d'analyses locales. Dans ce cas, une représentation par cartographie de distribution des valeurs devient un outil visuel intéressant. C'est ce qui a été utilisé dans les travaux de L. Tapie concernant l'étude des difficultés d'usinage d'outillages de forge [TAP07a] [TAP08] [TAP07b], ainsi que dans des analyses de surfaces complexes à usiner [BAL00] [SUN01]. Quelques systèmes vont même jusqu'à fournir des suggestions de reconception, en proposant des modifications des paramètres de conception pour améliorer la fabricabilité, par exemple une entité par une entité similaire dans le but de minimiser le nombre de posages [DAS96].

2.3. Quelles caractéristiques choisir pour une application au domaine de l'outillage ?

Nous avons vu qu'il n'existait pas de méthodes de DFM spécifiquement adaptées au domaine de l'outillage. Il convient alors de définir les caractéristiques de la méthodologie que nous souhaitons mettre en place, au regard de la classification précédente.

2.3.1. Le type d'approche : direct

Dès lors que nous désirons développer une méthode d'analyse de la fabricabilité applicable lors de la phase de conception, il semble délicat d'utiliser une approche indirecte. En effet, ce type d'approche oblige à définir une première gamme de fabrication et cette opération nécessite des connaissances pointues dans les technologies de fabrication (choix des procédés, des stratégies d'usinage, etc). Nous avons vu que ces connaissances ne font pas partie du cœur de métier des concepteurs. En conséquence, notre approche sera directe, avec comme point d'entrée la définition numérique de l'outillage, et un ensemble de règles y seront appliquées afin d'en évaluer son degré de difficulté de fabrication.

2.3.2. La mesure de la fabricabilité : évaluation quantitative de la complexité de fabrication

En termes d'évaluation de la fabricabilité, nous souhaitons disposer de mesures plus performantes qu'une simple estimation qualitative. En effet, il va s'agir de comparer différents procédés de fabrication, ceux par ajout de matière et ceux par enlèvement de matière, il est alors indispensable de s'appuyer sur une mesure quantitative de la complexité de fabrication la plus précise possible. Les évaluations des temps et des coûts de fabrication sembleraient appropriées, cependant, elles ne sont pas aisées à mettre en place dès la phase de conception car leurs mesures sont fortement contraintes par la gamme de fabrication choisie. Pour prendre le cas de l'usinage, la durée de fabrication est directement liée à la stratégie et aux parcours choisis, ainsi qu'aux conditions de coupe désirées, et nous avons vu que des choix raisonnés ne pouvaient être faits que par des spécialistes de la FAO. De plus, si nous nous orientons vers une fabrication par ajout de matière, le coût de réalisation va

englober toutes les phases de production, y compris les post-traitements (grenaillage dans le but d'assurer une qualité et un état de surface appropriés), ce qui ne n'est pas évident à chiffrer en phase de conception.

Ainsi, nous allons nous orienter vers des calculs d'indices de fabricabilité, c'est-à-dire l'association aux outillages, ou à des parties d'outillages, de valeurs de complexité de fabrication adimensionnelles et normées. Ces indices seront directement calculables à partir des modèles CAO des outillages. Ils ne permettront pas de donner une valeur concrète du temps de fabrication, mais faciliteront les comparaisons entre différentes conceptions (notamment entre une définition monobloc de l'outillage et une conception modulaire hybride). La définition de ces indices et l'analyse de complexité de fabrication sont au centre du chapitre trois.

2.3.3. L'interaction utilisateur / système : données d'entrée = modèle CAO, données de sorties = valeur des indices et cartographies

Notre méthodologie présente comme point de départ caractéristique la volonté de s'écarter d'une représentation par entités de l'outillage. Nous justifierons et développerons cet aspect ultérieurement (au chapitre suivant), en faisant une analyse fine des moyens de représentation de la morphologie des pièces.

En ce qui concerne les informations disponibles en retour, nous disposerons bien évidemment des valeurs des indices de fabricabilité, définissant ainsi le degré de difficulté de fabrication d'un outillage. En outre, nous proposons également une représentation par cartographie de la distribution de cette difficulté de fabrication. L'objectif est de fournir au concepteur un maximum de données sur la fabricabilité, c'est pourquoi nous utiliserons ce concept de cartographie lorsque les valeurs d'indices de fabricabilité seront calculées localement et varieront d'une zone de l'outillage à une autre. À partir de ces informations sur un outillage monobloc, un outillage modulaire hybride est défini, et la CAO des modules devient le point d'entrée d'une nouvelle analyse de fabricabilité afin d'observer la diminution des difficultés de fabrication induite par l'application des points de vue modulaires et hybrides.

2.3.4. Remarque et synthèse

En guise de remarque, notons qu'il existe d'autres possibilités de classification des méthodologies de DFM que celle présentée ci-dessus. Parfois, la distinction se fait entre méthodes basées sur des règles et méthodes basées sur des indices [SAL08]. Dans le premier cas, un ensemble de règles est élaboré par des experts du domaine, l'approche DFM mesure alors le degré de respect de ces règles et propose ensuite un retour aux utilisateurs pour optimiser la conception. Dans le cas des méthodes basées sur les indices, le système DFM fournit une estimation de la fabricabilité de la pièce conçue. L'évaluation peut se faire par une mesure binaire, qualitative ou quantitative, ou par une mesure des temps de fabrication ou des coûts. Pour notre approche, nous combinons les deux types de méthodes, puisque nous développons des indices pour évaluer quantitativement la fabricabilité de l'outillage, mais l'analyse des valeurs des indices permet également de proposer des modifications dans la conception de l'outillage, en adoptant les points de vue modulaire et hybride.

La Figure 13 propose une synthèse des caractéristiques nécessaires à une méthodologie de conception d'outillages basée sur une analyse de fabricabilité.

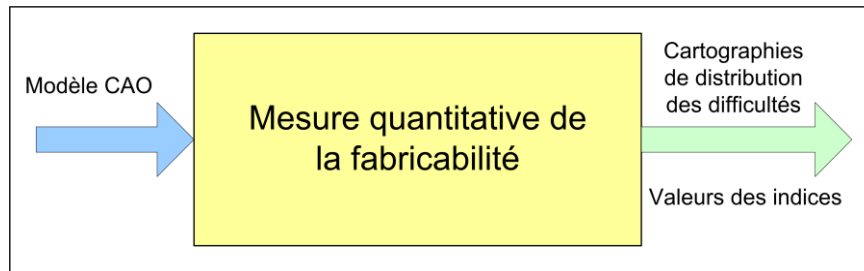


Figure 13. Caractéristiques de la méthodologie de conception d'outillages vis à vis d'une approche DFM.

Les données d'entrée sont définies par le type d'approche choisi et doivent être renseignées par l'utilisateur (le concepteur d'outillages), la valeur ajoutée correspond aux mesures de fabricabilité effectuées par le système et les données de sortie comprennent les informations fournies en retour au concepteur.

Ce système va être développé pour une application adaptée à la conception d'outillages modulaires hybrides, c'est pourquoi nous allons voir dans les parties suivantes les spécificités d'une approche modulaire puis celles d'une approche hybride.

3. L'approche modulaire

3.1. Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les spécificités de la conception d'outillages modulaires reposent sur deux contraintes :

- La prise en compte des évolutions géométriques de la pièce à obtenir ;
- Une réalisation plus rapide et moins coûteuse assurant le niveau de qualité requis.

Nous allons donc détailler dans cette partie les différents travaux incluant ces deux aspects de la modularité.

3.2. La modularité pour améliorer la flexibilité

La nécessité de flexibilité dans les productions modernes a été étudiée d'un point de vue économique, notamment dans les travaux de W.L. Berry [BER99] ou de J. Jiao [JIA04]. Ces travaux démontrent les gains potentiels de productivité des entreprises qui tiennent compte de la diminution de la taille des lots liée à la personnalisation des produits et adoptent des stratégies de production flexibles.

La prise en compte de l'aspect modulaire pour améliorer la flexibilité ne se restreint évidemment pas au simple cadre de la conception d'outillages. Dans le domaine de la construction de bâtiments, par exemple, la fabrication en usine de modules puis l'assemblage sur site permet un gain en qualité et en temps (donc en coût) de réalisation de certaines maisons individuelles [NAS07]. En effet, les avantages pour le constructeur proviennent d'une part du fait que les ressources des différents chantiers restent sur un même lieu. En outre, la standardisation et l'amélioration continue de produits existants améliorent la qualité des produits. De plus, pour le client, la modularité permet la personnalisation de son habitation par l'agencement de modules ainsi qu'une économie substantielle. À une autre échelle, la conception – fabrication de centrales nucléaires américaines bénéficie également des apports de l'aspect modularité [LAP97]. En utilisant des procédés de fabrication série, les coûts de fabrication sont mieux maîtrisés. De plus, le travail de construction n'est plus tributaire des saisons puisque la réalisation des modules se fait en atelier.

L'application du point de vue modulaire pour répondre à une problématique de différenciation de produits a fait l'objet de nombreuses recherches, notamment au laboratoire G-SCOP de Grenoble. Des méthodes de conception modulaire s'utilisent à de nombreux niveaux, jusqu'aux processus industriels [FLO05].

Désormais, le concept de modularité s'applique également lorsque l'on étudie la phase de recyclage d'un produit, en regroupant au sein d'un même module des matériaux qui peuvent être recyclés sans séparation [UME08].

Dans le domaine des outillages, certains travaux proposent une conception d'outillages flexibles pouvant ainsi s'adapter aux contraintes de personnalisation de produits induites par les demandes clients. L'idée est de concevoir des outillages avec un ensemble de poinçons dont la hauteur est réglable. Un exemple dans une application de mise en forme de tôles minces est proposé sur la Figure 14. Nous retrouvons ce type d'outillages (*multi-point forming die*) dans les travaux de M. Li [LI99], de E. Haas [HAA02], de A. Kelkar [KEL05] et de D.T. Pham [PHA07]. Pour reprendre l'aspect

modularité, chaque poinçon est vu comme un module, réutilisable dès que la pièce à former est modifiée. Néanmoins, les applications de ces outillages restent cantonnées à la mise en forme de tôles de forme relativement simples et cette approche est difficilement transposable à d'autres genres d'application.

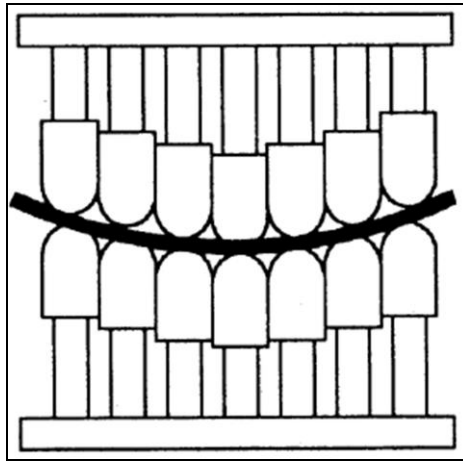


Figure 14. Exemple d'outillage flexible [LI99].

3.3. La modularité pour améliorer la fabricabilité

3.3.1. Travaux initiaux en usinage

Outre cet objectif de flexibilité, une approche modulaire va également permettre de faciliter la fabrication d'un produit.

Il existe peu, à notre connaissance, de méthodes robuste et fiables de conception modulaire ayant pour objectif de faciliter la fabrication. Au sein de notre équipe de recherche, les travaux effectués autour du concept MCP (que nous développerons dans la dernière partie de ce chapitre) ont permis de mettre en évidence l'intérêt que présente le développement d'une approche méthodologique intégrant une approche modulaire pour améliorer la fabricabilité. Une de nos précédentes études a notamment démontré que la fabrication par usinage d'un outillage conçu en modules possède des avantages par rapport à une conception monobloc [KER06]. Dans certains cas, on peut observer un gain de temps de fabrication, ce qui a pour conséquence une diminution du coût. Dans d'autres cas, on peut améliorer la qualité de l'outillage réalisé. Lorsque la fabrication des différents modules peut se faire sur des machines différentes et simultanément, la durée de fabrication des modules se limite à celle du module le plus long à usiner. Lorsque l'usinage de l'outillage monobloc est complexe (utilisation d'outils de coupe longs et de faibles diamètres), on peut observer des défauts de qualité des surfaces usinées (liés à des phénomènes de vibration et de flexion d'outil). Aussi, il peut être préférable de décomposer l'outillage en différents modules, simples à usiner et ne nécessitant plus ces outils peu rigides.

3.3.2. Exemple industriel

Il existe cependant des exemples industriels où cet aspect modularité pour améliorer la fabricabilité a été pris en compte. À chaque fois, on constate l'absence de méthodes scientifiques de choix de découpage en modules et d'évaluation des gains, seuls les aspects intuitifs reposant sur les connaissances de l'expert en fabrication interviennent dans les choix. C'est par exemple le cas du noyau de moule pour la fonderie de précision réalisé par usinage et présenté sur la Figure 15.

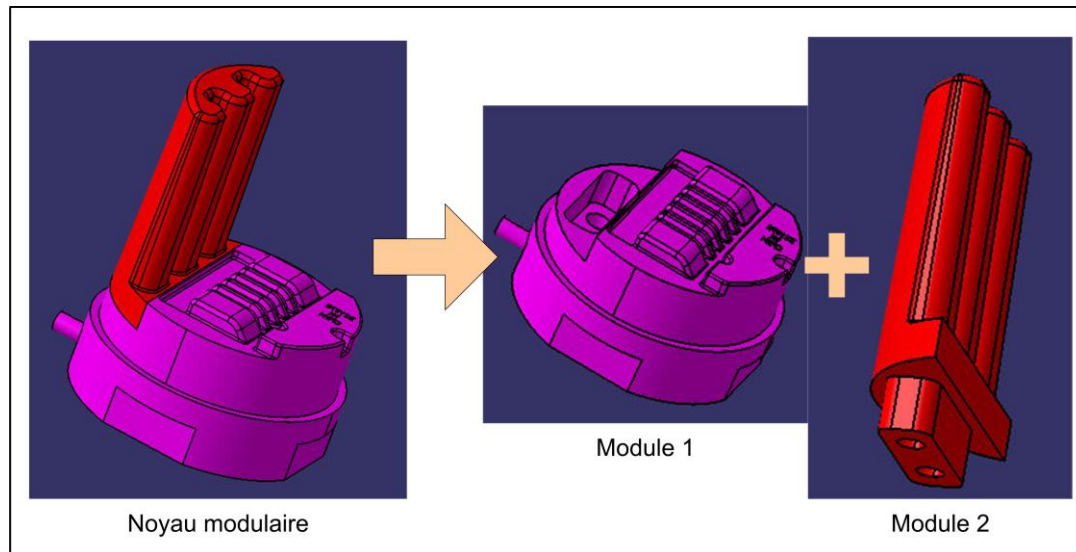


Figure 15. Noyau modulaire de moule pour la fonderie de précision.

Ce noyau est donc constitué de deux modules assemblés. La fabrication de cette pièce aurait posé plusieurs problèmes si elle avait été conçue de façon monobloc. D'une part, l'importante quantité de copeaux à enlever (près de 70 % de la pièce brute) induit un coût élevé (matière, utilisation des machines, outils, ...). D'autre part, des problèmes pour réaliser les usinages seraient apparus en raison de la longueur des outils nécessaires (supérieure à 100 mm), ce qui aurait imposé de réaliser cette empreinte complexe en électroérosion. La conception de la pièce en deux modules a permis de répondre à ces deux problèmes. L'usinage est ainsi facilité car les deux parties du noyau ne présentent pas de difficultés d'usinage en 3 axes avec plusieurs posages.

Notons tout de même que cette fabrication modulaire impose de nouvelles contraintes : l'usinage des formes nécessaires à l'assemblage et une reprise en tournage du noyau assemblé pour assurer la continuité dans la courbure de la forme cylindrique extérieure. En ce qui concerne l'assemblage, la solution retenue pour la liaison encastrement entre les deux modules est un ensemble tenon – mortaise complété par 2 vis pour le maintien en position. Cela nécessite donc un usinage de qualité des surfaces en contact pour avoir un ajustement convenable. Tout comme le choix du découpage en modules, le choix des solutions d'assemblages reste intuitif de la part de l'industriel et ne s'appuie pas sur une méthodologie de raisonnement.

3.3.3. Domaine de la fabrication par ajout de matière

Dans le domaine de la fabrication par ajout de matière, des décompositions en modules sont également utilisées. Citons notamment les travaux de C.K. Chan relatifs à la décomposition de modèles CAO de grandes dimensions pour une fabrication par ajout de matière [CHA03b] [CHA05]. En plus d'une synthèse bibliographique très complète sur les méthodes de décompositions volumiques, l'auteur propose un algorithme de décomposition de pièces de grandes dimensions en composants plus petits dans le but de fabriquer ceux-ci plus facilement sur des machines de fabrication additive (3DP, SLS ou FDM). Un exemple est fourni sur la Figure 16. Les difficultés résident dans la définition des surfaces qui permettent de « couper » la pièce, ainsi que l'ajout d'entités servant à réaliser les assemblages entre les différentes parties.

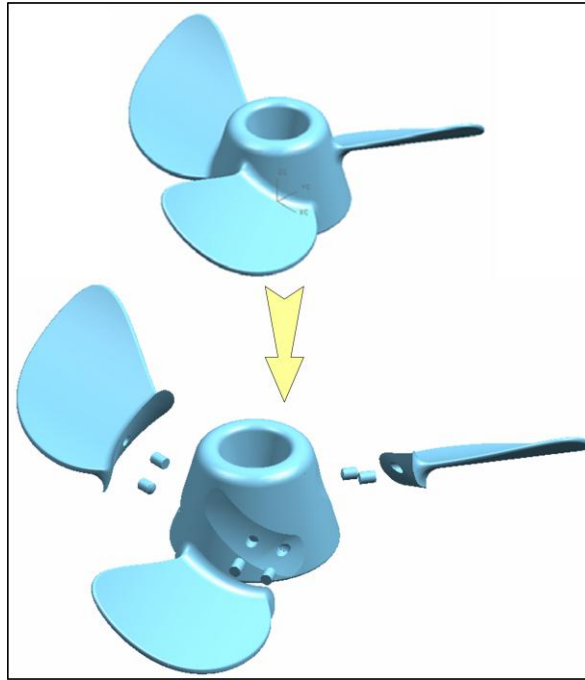


Figure 16. Décomposition volumique d'une hélice [CHA03b].

Ces travaux se rapprochent de ceux de D. Dimitrov, qui étudie également la fabrication par ajout de matière de pièces de grandes dimensions (c'est-à-dire de dimensions supérieures au volume de travail acceptable par la machine) [DIM07]. Cependant, le découpage de la pièce en composants de plus faibles dimensions ne semble pas automatisé ni reposer sur une méthodologie claire. À titre d'exemple, la Figure 17 représente un modèle de corps de joint de cardan réalisé en 11 modules (pas tous visibles sur la figure) sur une imprimante 3D dans le but de faire une pièce moulée en aluminium. La pièce est décomposée suivant des plans qui minimisent les déformations des modules ainsi créés. Ce découpage, complexe, n'est pas issu d'une méthode rigoureuse de décomposition en modules. De plus, pour certaines parties, la construction d'un support de structure (nervure) est nécessaire pour assurer la tenue des pièces lors de leur fabrication par ajout de matière. L'assemblage, manuel, peut également engendrer la réalisation de nouveaux supports pouvant servir de base pour faciliter l'assemblage des différents modules, mais complexifier un peu plus la pièce.



Figure 17. Modèle modulaire de corps de joint de cardan [DIM07].

Un découpage en modules d'une pièce peut également trouver des avantages en termes de fabricabilité lorsque la décomposition est fondée sur l'accessibilité de chaque module pour une réalisation par Stratoconception. Un exemple est présenté sur la Figure 18, dans laquelle une tranche de la pièce à fabriquer par Stratoconception est réalisée en trois modules [HOU07].

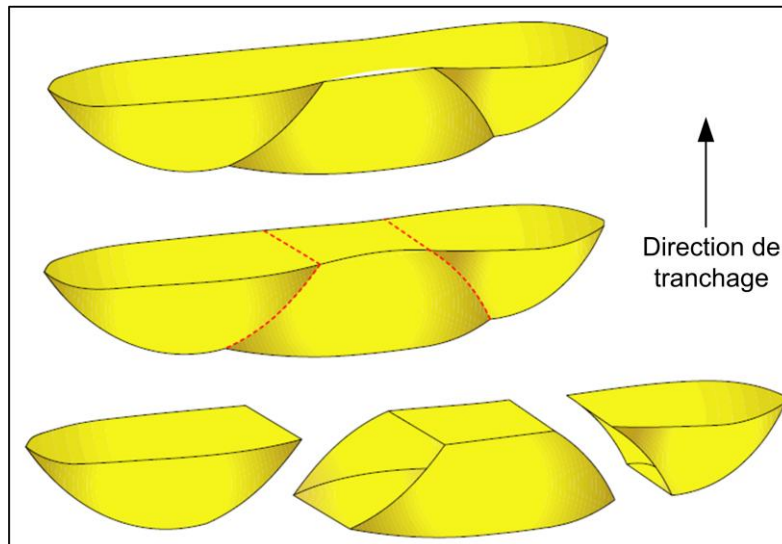


Figure 18. Décomposition d'une tranche de Stratoconception en trois modules [HOU07].

Ce type de découpage en modules est également étudié pour des pièces réalisées par moulage, où des modules sont créés dans le but de faciliter le démoulage de la pièce (après analyse de l'aptitude au moulage de la pièce et de ses zones en contre-dépouilles) [RUB06] [BAN07] [HUI97] [YIN01] [HUA03].

3.3.4. Contraintes liées au nombre de modules

La décomposition d'une pièce en plusieurs modules simples à réaliser va donc permettre d'améliorer grandement sa fabricabilité, par exemple en s'affranchissant de difficultés d'usinage. En revanche, la multiplication de modules rend l'assemblage de plus en plus complexe. Il y a donc un optimum à trouver pour décomposer une pièce en un nombre raisonnable de modules qui facilitent sa fabrication mais qui n'induisent pas de contraintes d'assemblage rédhibitoires. La recherche de cet optimum a fait l'objet de travaux en théorie économique (Figure 19) [TSA99].

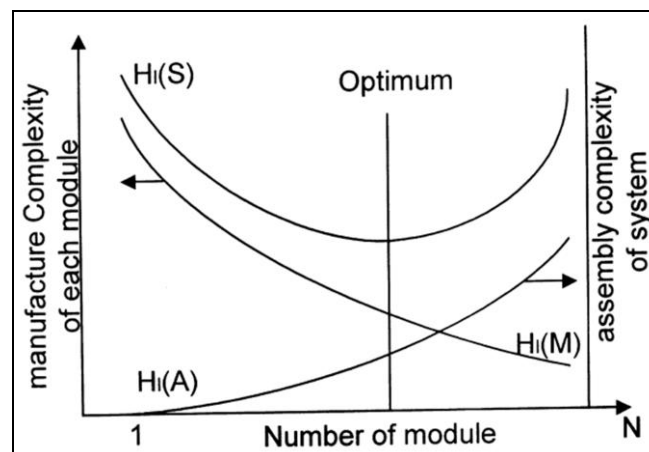


Figure 19. Recherche d'un nombre de modules optimal [TSA99].

$H_i(A)$ représente la complexité d'assemblage, $H_i(M)$ celle de la fabrication, $H_i(S) = H_i(A) + H_i(M)$.

Il semble désormais nécessaire que les choix de découpage en modules ne reposent plus uniquement sur les compétences d'un humain, mais leurs connaissances doivent être capitalisées et former la base de méthodes d'aide à la conception.

3.4. Conclusion sur l'aspect modulaire

Ces constats justifient l'intérêt que peut présenter le développement d'une méthodologie fiable de conception d'outillages intégrant une approche modulaire ayant pour double objectif d'améliorer la flexibilité et la fabricabilité. Bien évidemment, les contraintes nouvelles imposées par l'assemblage des différents modules sont à prendre en compte. Il faut tenir compte des spécificités des formes composant les modules afin de définir, directement dans la conception des modules, les surfaces qui vont intervenir dans la réalisation des liaisons encastrements entre les modules. L'approche modulaire doit permettre de garantir des fonctionnalités équivalentes entre l'outillage monobloc et son dérivé modulaire.

Pour cela, M. Rivette a développé le concept de Carte d'Identité d'Assemblage (CIA) [RIV07b]. Les CIA définissent les caractéristiques d'assemblages standards paramétrés et spécifiés capables de réaliser l'assemblage de modules entre eux. Les caractéristiques et spécifications (dimensionnelles et géométriques) sont réalisées grâce à l'utilisation d'outils de tolérancement et regroupées dans une base de données. Ainsi, la définition des contraintes d'assemblage des différents modules se fait automatiquement à l'aide de la base de données d'assemblages standards.

Nous pourrions utiliser ces travaux dans notre approche afin de proposer des conceptions modulaires d'outillages, basées sur l'analyse de la complexité de fabrication, qui respectent les règles d'intégration et d'assemblages des différents modules entre eux.

4. L'approche hybride

4.1. Introduction

Comme nous venons de le voir dans la partie précédente au travers de l'exemple de la Figure 15, une approche modulaire pour un outillage permet d'opter pour un découpage en modules qui facilite la fabrication de l'outillage. Le fait de décomposer notre outillage en différents modules peut également être avantageux dans le cas où l'on peut choisir des procédés de fabrication différents pour les différents modules. On utilise alors chaque procédé à bon escient, c'est-à-dire que les zones de l'outillage qui nécessitent (pour des raisons de coût ou de qualité) l'utilisation d'un procédé par enlèvement de matière sont usinées, et les zones pour lesquelles un procédé par ajout de matière est plus favorable vont être réalisées par une technologie additive. Il devient alors nécessaire de s'intéresser aux méthodes de comparaisons de procédés et de bien connaître les limites technico-économiques de ces différents procédés.

4.2. Méthodes de comparaisons de procédés

De nombreuses méthodes visent à faire des choix raisonnés de procédés de fabrication. La première étape de ces méthodes consiste à vérifier l'adéquation ou non, en termes de faisabilité, de la pièce avec les procédés considérés. Cette étape ne peut se faire sans une définition robuste de ce qui est faisable ou non avec chaque procédé et cette définition s'obtient à l'aide d'études des limites technico-économiques des procédés. Ces études sont présentées dans le paragraphe suivant. Dans un deuxième temps, lorsque les procédés compatibles avec la réalisation de la pièce ont été sélectionnés, il convient de classer ces procédés selon un (des) indice(s) donné(s). Par exemple, un indice de temps de fabrication. Souvent, plusieurs indices sont utilisés pour classer les procédés. Dans ce cas, il est nécessaire de pouvoir associer les indices entre eux pour une comparaison efficace.

Dans le domaine de la réalisation d'outillages pour la fonderie sable ou cire perdue, des méthodes de comparaisons par paires sont utilisées [PAL07]. Pour ce qui est des procédés de fabrication par ajout de matière, différentes méthodes de comparaisons existent, certaines basées sur les méthodes matricielles AHP [ARM08], d'autres sur les systèmes experts [MAS02].

Les problèmes existants avec ces méthodes sont de plusieurs types. D'une part, il existe très peu de méthodes permettant de comparer les procédés par ajout et enlèvement de matière. En effet, la connaissance de ces procédés fait appel à des compétences différentes et nécessite de bien connaître les procédés et leurs limites d'utilisation pour faire des choix raisonnés de procédés de fabrication. D'autre part, la mise en place d'indices fiables et comparables pour apprécier la qualité d'un procédé par rapport à un autre apparaît difficile.

4.3. Limites technico-économiques de l'usinage grande vitesse et des procédés par ajout de matière

4.3.1. Caractéristiques dimensionnelles

Pour commencer, intéressons-nous aux dimensions minimales des surfaces qui peuvent être générées par usinage. Pour ce qui est des voiles minces, on trouve très couramment en UGV des épaisseurs inférieures à 1 mm, plusieurs travaux de recherche démontrant la possibilité de réaliser des voiles d'épaisseur 0,4 à 0,8 mm [BRA05]. Afin de garantir l'efficacité technico-économique du procédé, les professionnels restreignent généralement le champ d'application de l'UGV à des parois d'épaisseur 0,2 mm sur 20 mm maximum de hauteur [JEG03]. Les caractéristiques dimensionnelles des poches sont directement liées à la longueur de l'outil de coupe. En effet, si l'outil est élancé, c'est-à-dire grande longueur pour un petit diamètre, se pose le problème de flexion d'outil due aux efforts de coupe, ce qui a pour conséquence une diminution de la précision d'usinage et de la qualité de surface générée. Une étude a montré l'influence du rapport longueur / diamètre de l'outil de coupe sur la profondeur de passe [FRI97]. La profondeur de passe maximale a_p dépend directement de deux facteurs K_2 et K_3 selon la relation suivante :

$$a_p = R \cdot K_2 \cdot K_3$$

Le facteur K_2 est déterminé à partir de la dureté du matériau à usiner (Figure 20), le facteur K_3 à partir du rapport longueur / diamètre de l'outil de coupe (Figure 21).

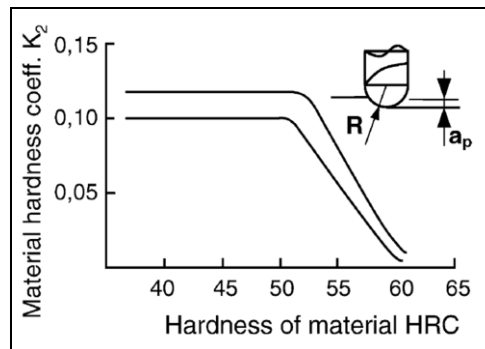


Figure 20. Relation profondeur de passe - dureté du matériau [KEC03].

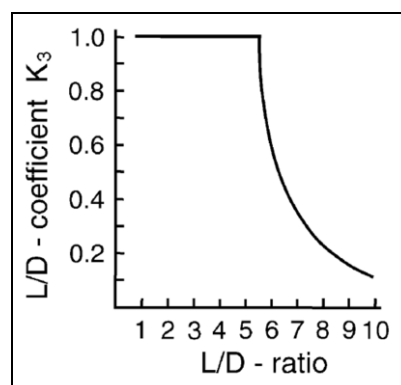


Figure 21. Relation profondeur de passe - rapport L/D [KEC03].

En ce qui concerne la valeur minimum des rayons de raccordement, la limite dépend une nouvelle fois du matériau, mais nous pouvons considérer qu'elle est de 0,3 mm pour un rayon de fond et de 1 mm pour un rayon intérieur, la limite étant donnée par les outils existants [JEG03].

Pour ce qui est des procédés de fabrication par ajout de matière, nous nous baserons sur le procédé DMLS d'EOS, procédé de fabrication rapide par lit de poudre avec des poudres en acier de 20 μm (DSH20 ou StainlessSteel 17-4) [EOS02] [EOS06] [EOS07a]. Les limitations proviennent du diamètre du faisceau laser focalisé, avoisinant les 0,4 mm. Comme pour d'autres procédés de fabrication, il est impossible de réaliser des structures inférieures à la dimension de l'outil utilisé. Les épaisseurs de paroi minimales sont de l'ordre de 0,4 mm. Les rainures réalisées avoisinent la tolérance de fabrication, soit 0,1 mm. Pour la réalisation de nervures ou de pions, le rapport largeur / hauteur est déterminant. Dans ce cas, EOS préconise de ne pas dépasser les rapports largeur / hauteur correspondants aux cases vertes des tableaux (Figure 22 et Figure 23).

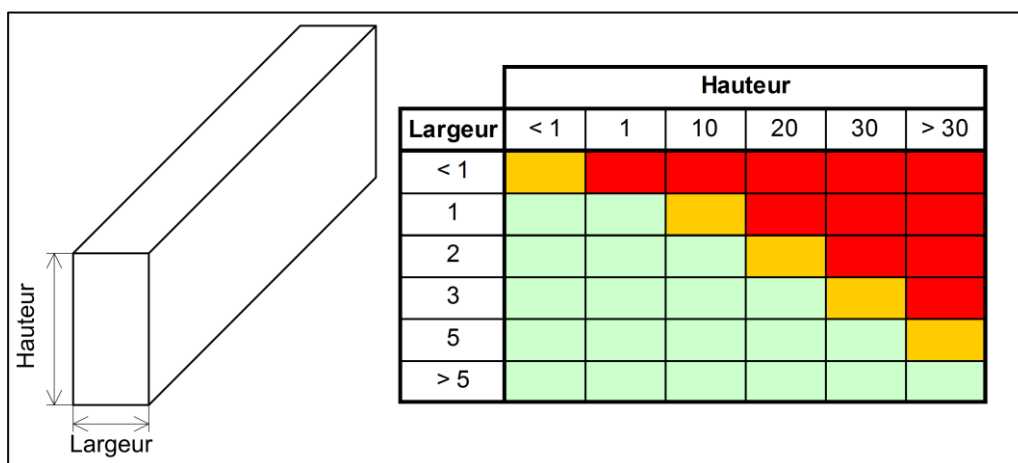


Figure 22. Limites dimensionnelles des nervures [EOS02].

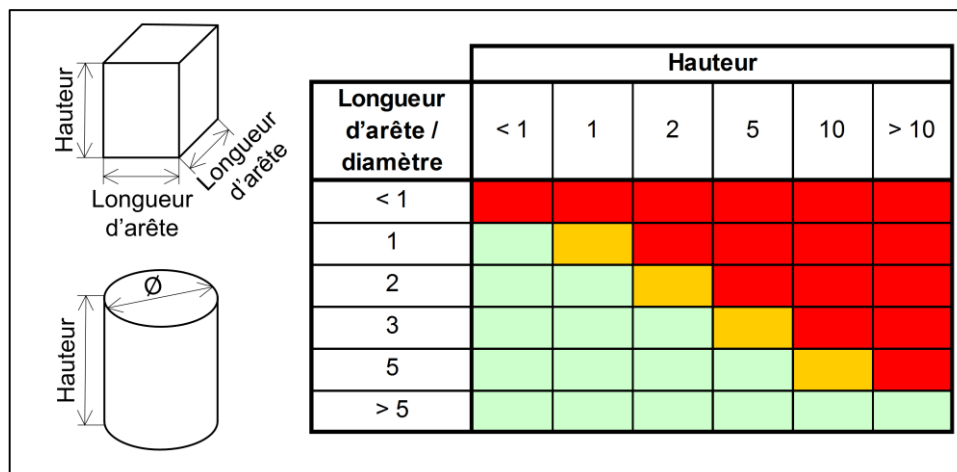


Figure 23. Limites dimensionnelles des pions [EOS02].

Tout autre forme, la plus complexe soit-elle, est, en théorie, réalisable par un procédé de fabrication rapide par ajout de matière. Il est notamment possible de réaliser des canaux de refroidissement complexes, épousant au mieux l'empreinte d'un moule, et permettant d'optimiser le cycle d'injection. Il subsiste néanmoins des limites induites par l'utilisation et l'élimination du matériau servant à réaliser les supports pour les surfaces dites en contre-dépouille.

4.3.2. Qualité des pièces

La précision dimensionnelle qu'il est technico-économiquement possible d'atteindre avec des machines d'usinage grande vitesse courantes dépend de la complexité des opérations d'usinage à mettre en œuvre pour réaliser la pièce. On considère que la précision maximum est de [KER06] :

- 5 μm pour des applications de complexité faible à moyenne en 3 axes ;
- 10 μm pour des applications complexes en 3 axes ;
- 20 μm pour des applications de complexité faible à moyenne en 5 axes simultanés ;
- 30 μm pour des applications complexes en 5 axes simultanés.

Les précisions indiquées ci-dessus peuvent uniquement être atteintes avec des conditions ambiantes constantes, des stratégies de coupe et des caractéristiques d'outil optimisées (revêtement, porte-outil, géométrie de l'outil, etc). À un certain degré, la précision peut dépendre de la dureté du matériau de la pièce à usiner.

Pour ce qui est de l'état de surface, on considère généralement que l'on peut atteindre une rugosité arithmétique $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ en UGV [JEG03].

Des études comparent les qualités des différents procédés de fabrication par ajout de matière. Une expérimentation s'appuyant sur la réalisation d'une pièce-test par 5 procédés différents a permis de mesurer la qualité dimensionnelle obtenue par SLS avec une poudre bronze 20 μm [KRU05]. La Figure 24 présente la pièce-test utilisée et le Tableau 2 les résultats obtenus.

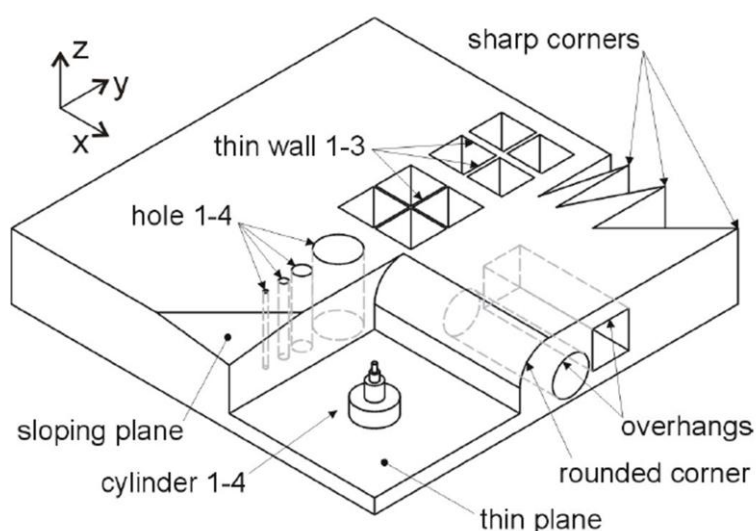


Figure 24. Pièce utilisée pour la comparaison des procédés de fabrication rapide [KRU05].

Dimension nominale	Longueur 50 mm	Largeur 50 mm	Hauteur 7 mm	Trou 1 Ø 5 mm	Trou 2 Ø 2 mm	Trou 3 Ø 1 mm	Trou 4 Ø 0,5 mm
Dimension obtenue	50,16	50,18	7,03	4,83	1,77	0,9	Pas construit
Dimension nominale	Cyl. 1 Ø 5 mm	Cyl. 2 Ø 2 mm	Cyl.3 Ø 1 mm	Cyl.4 Ø 0,5 mm	Voile 1 1 mm	Voile 2 0,5 mm	Voile 3 0,25 mm
Dimension obtenue	5,12	2,1	1,12	0,63	1,16	0,68	0,47

Tableau 2. Résultats géométriques pour le frittage laser [KRU05].

Les résultats obtenus sur les mesures de rugosité pour cette pièce sont les suivants :

- $Ra(x) = 10,45 \mu\text{m}$;
- $Rt(x) = 67,81 \mu\text{m}$;
- $Ra(y) = 10,72 \mu\text{m}$;
- $Rt(y) = 75,42 \mu\text{m}$.

On voit donc que la précision dimensionnelle d'une pièce fabriquée par ajout de matière dépend de la géométrie fabriquée. En effet, l'écart entre les dimensions obtenues et nominales sont variables suivant que l'on s'intéresse à la réalisation de surfaces planes (longueur, largeur ou hauteur) ou à la réalisation de surfaces cylindriques (cylindres pleins ou trous). Cette caractéristique a également été mise en évidence dans des travaux effectués par notre équipe de recherche [PES06]. En effet, E. Pessard a développé une pièce-test fabriquée par DMLS contenant différentes géométries (présentée sur la Figure 25) et a comparé les écarts par rapport aux dimensions nominales d'un ensemble de 14 pièces réparties sur deux plateaux de fabrication (Figure 26). Ses travaux mettent également en avant une corrélation entre la distance de la zone fabriquée au centre du plateau de fabrication, comme le montre la Figure 27, avec la définition d'une distance limite de 100 mm au-delà de laquelle les écarts s'amplifient drastiquement.

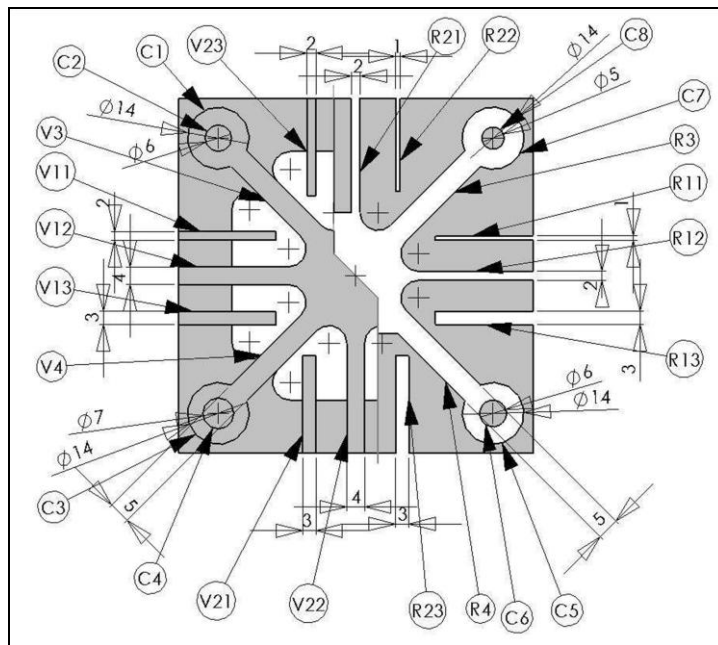


Figure 25. Représentation des surfaces et repérage des surfaces d'une pièce-test [PES06].

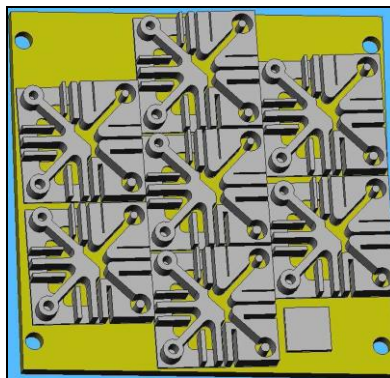


Figure 26. Positionnement de 7 pièces sur un plateau de fabrication [PES06].

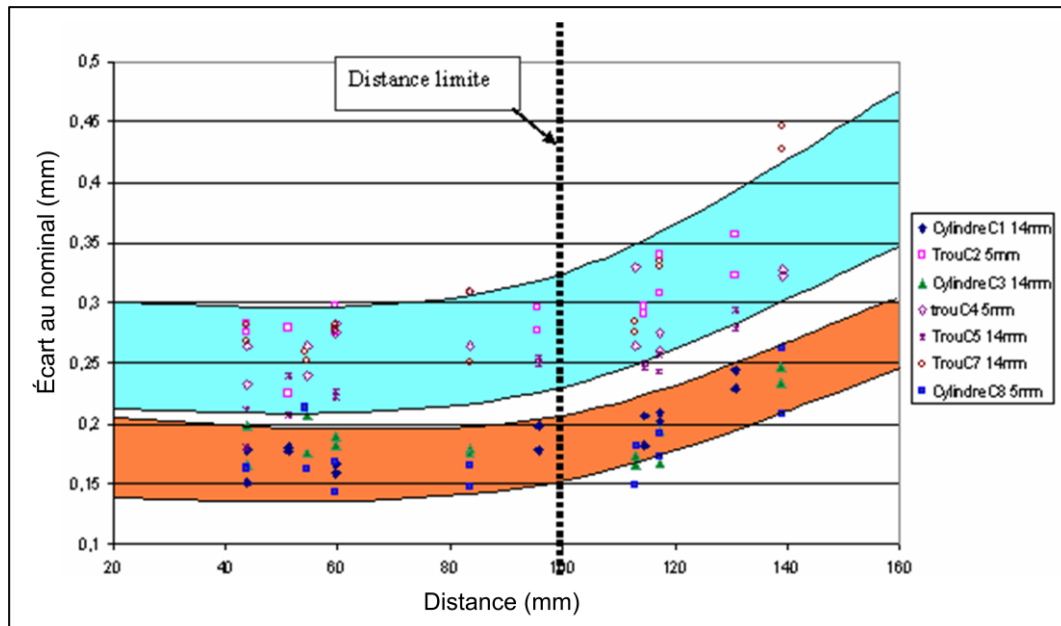


Figure 27. Variation de la surépaisseur des cylindres en fonction de leur distance au centre [PES06].

4.3.3. Conclusions sur les limites technico-économiques des procédés

Ces analyses montrent bien que les procédés par ajout de matière, au travers de l'exemple du DMLS, pèchent encore par manque de précision dimensionnelle et de qualité d'état de surface par rapport au procédé d'usinage. En revanche, les limites géométriques ne sont pas du tout les mêmes. Les dimensions limites des outils de coupe imposent des limitations dans la topologie des surfaces générées par usinage, alors que la forme peut être beaucoup plus libre et complexe en fabrication par ajout de matière. On choisira donc de retenir l'UGV comme choix prioritaire pour réaliser les outillages, avec des parties réalisées par ajout de matière lorsque les limites de l'usinage sont atteintes.

4.4. Outillages fabriqués par combinaisons d'usinage et de fabrication rapide

Dans le but d'utiliser ces procédés par ajout et enlèvement de matière à bon escient, il convient de les combiner afin de bénéficier des avantages de l'usinage (précision et qualité d'état de surface) et de la fabrication par ajout de matière (géométries plus complexes possibles). Des systèmes de fabrication hybrides existent déjà, comme par exemple Eclipse-RP [HUR02]. Il s'agit de décomposer en couches de différentes épaisseurs la pièce à fabriquer et de réaliser ces couches par usinage et dépôt. L'enjeu est ici de bien choisir la décomposition pour avoir le maximum de surfaces à usiner dans une couche, c'est-à-dire que la décomposition se fait suivant les directions d'usinage [KI02]. Dans le domaine de l'outillage, l'application de l'aspect hybride permet de résoudre certains problèmes d'accessibilité [CHE01]. Pour ces combinaisons de dépôt de matière / enlèvement de matière, des centres d'usinage sont modifiés pour y insérer une buse d'arrivée de matière sous forme de poudre ainsi qu'un laser comme source d'énergie, le tout monté directement à la place de la broche de la machine-outil [KER04]. Cette technologie a d'ailleurs été retenue pour la dernière machine de fabrication acquise par notre laboratoire et livrée en septembre 2009. La Figure 28 montre un exemple d'une pièce réalisée par combinaison des techniques d'usinage et de dépôt de matière sur une seule machine.

Cette combinaison des technologies permet d'obtenir des pièces pour lesquelles l'effet d'escalier inhérent à une fabrication couche par couche est minimisé grâce à l'opération de finition par enlèvement de matière qui est réalisée à chaque couche. De plus, on s'affranchit ainsi des défauts et de l'augmentation du temps liés à la remise en position due au changement de machine. Néanmoins, ces applications ne témoignent pas de l'existence de méthodologies permettant de réaliser des pièces combinant à bon escient les différentes technologies.



Figure 28. Exemple de pièce combinant dépôt de poudre et usinage de finition sur une seule machine [KER04].

4.5. Conclusion sur l'aspect hybride

Ces exemples constituent une combinaison de procédés par ajout et enlèvement de matière, mais ils ne permettent pas de réaliser des pièces composées de parties usinées et de parties réalisées par ajout de matière. À notre sens, c'est là que se situe un grand intérêt de l'aspect hybride : pouvoir utiliser chaque technologie pour réaliser les différentes zones de l'outillage. Les zones les plus faciles à fabriquer seront avantageusement fabriquées par UGV, les zones qui nécessitent une fabrication par ajout de matière seront réalisées par un procédé adapté, comme par exemple le procédé par lit de poudre DMLS. Nous envisageons également la possibilité de réaliser ces zones nécessitant une fabrication additive par projection de poudre directement sur la base de la pièce usinée. En effet, nous avons vu dans le chapitre précédent que le fort potentiel de développement de machines performantes de projection de poudre (déplacements en 5 axes, possibilité de multimatériaux, amélioration de la qualité des pièces produites, etc) additionné à l'étude de dépôt de poudre métallique sur des préformes usinées autorisent ce type de combinaison de procédés en se libérant des contraintes d'assemblage.

5. Le concept MCP

5.1. Définition

Une méthodologie de conception et de fabrication d'outillages rapides hybrides a fait l'objet de trois thèses au sein de l'équipe MO2P, avec la définition et l'utilisation du concept MCP (Multi Component Prototype). Le but de cette partie est de présenter ce concept, sa mise en œuvre ainsi que les verrous non levés par cette méthode.

La méthodologie proposée par l'équipe se base sur le concept MCP. Selon la définition générale, un MCP est un produit ou un outillage prototype composé de plusieurs pièces, dont la définition technique et les performances par rapport aux essais effectués sont représentatifs de la définition fonctionnelle monobloc dont elle est issue [LES05].

5.2. Méthodologie

Ce concept a été développé pour répondre à la problématique d'obtention d'un outillage adapté aux variantes et essais en phase de conception détaillée, en vue de réduire les itérations lors des phases exploratoires. L'objectif est de proposer un découpage en modules d'un outillage à partir de son modèle CAO qui réponde à 3 questions :

- Comment découper le système monobloc en fonction des variantes définies par le bureau d'études ? Il s'agit de l'analyse de faisabilité développée dans les travaux de thèse de Thierry Lesprier [LES05] ;
- Comment et avec quels procédés réaliser les différents modules avec pour objectif de réduire le coût ou le délai ? Cette analyse de fabrication permettant d'optimiser la fabrication des différents modules d'un point de vue délai, coût et conformité a été traitée dans la thèse de Frédéric Gillot [GIL06] ;
- Comment assembler les différents modules dans le respect du cahier des charges initial et des caractéristiques du système monobloc ? Les travaux de thèse de Mickaël Rivette [RIV07b] constituent cette analyse d'assemblage et de synthèse.

La Figure 29 présente ces 3 analyses et leurs interactions.

Ce concept et ses applications ont été l'objet de plusieurs communications et publications [LES04a] [LES04b] [MOG06b] [MOG07] [RIV07c].

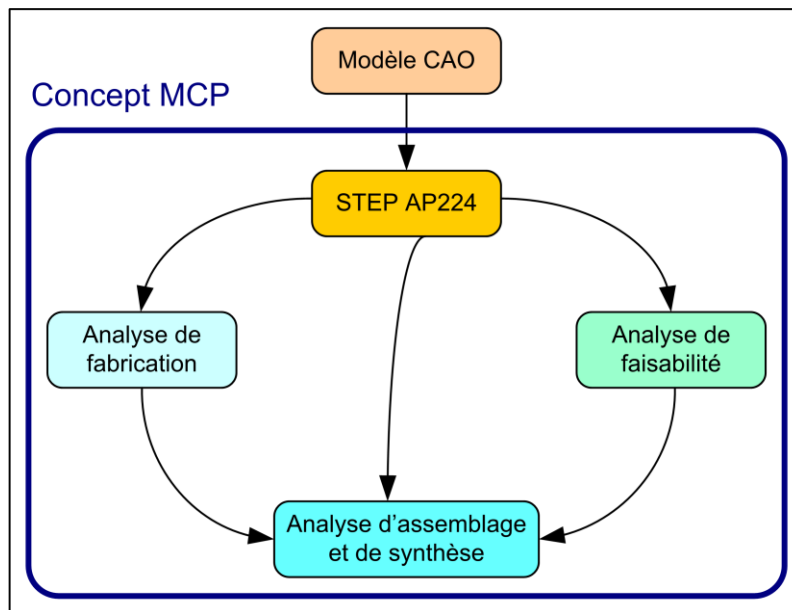


Figure 29. Concept Multi Component Prototype [RIV07b].

5.3. Les limites du concept

Comme on le voit sur la figure précédente, la donnée d'entrée commune aux trois analyses est le fichier STEP AP224 issu du modèle CAO de l'outillage.

Ce fichier correspond à une transposition normalisée du modèle CAO, créé avec n'importe quel outil de conception assistée par ordinateur, en un ensemble d'entités de fabrication prédéfinies. Les entités de fabrication définies dans cette norme ISO 10303-224 [ISO01] sont au nombre de 16 (plus différentes sous-catégories), elles correspondent à des entités d'usinage par enlèvement de matière. Il est donc délicat d'utiliser ces entités d'usinage pour une application de fabrication par ajout de matière. De plus, les entités existantes ne prennent pas suffisamment en compte les possibilités de surfaces complexes pourtant monnaie courante dans la conception d'outillages de mise en forme. Une analyse plus aboutie des limites des décompositions en entités est réalisée dans le chapitre suivant, mais nous pouvons déjà conclure que ce type de décomposition n'est pas optimal pour notre domaine d'étude.

En outre, la décomposition en modules n'est réalisée qu'à des fins d'amélioration de l'adaptabilité de l'outillage aux différentes variantes de produits ou bien pour permettre une réalisation par différents procédés (usinage grande vitesse, électroérosion ou procédé de fabrication rapide). Comme nous l'avons vu précédemment, les technologies ont évolué, permettant de limiter l'utilisation de l'électroérosion, et rendant aujourd'hui possible la réalisation de pièces par projection de poudre. De plus, il apparaît important de pouvoir envisager une décomposition de l'outillage en modules même si ceux-ci sont réalisés par le même procédé.

Toutes ces analyses nous amènent à poser clairement la problématique de ces travaux de thèse, ils sont présentés dans la partie suivante.

6. Problématique de nos travaux de thèse

Nous nous intéressons à la fabrication d'outillages modulaires hybrides. Nous avons vu dans la première partie l'importance de développer une méthodologie de prise en compte des contraintes de fabrication le plus en amont possible, c'est-à-dire dès la phase de conception.

De plus, l'analyse des travaux existants dans le domaine du DFM présentée dans la deuxième partie nous a conduits à définir les caractéristiques de notre méthodologie. Nous souhaitons baser les données d'entrée sur le simple modèle CAO de l'outillage, afin de ne pas dépendre de phases de préparation à la fabrication, délicates à mettre en œuvre et dépendant fortement de connaissances métiers des experts de la fabrication (choix de stratégies, des outils et des conditions de coupe, pour prendre l'exemple de l'usinage). À partir de ce modèle CAO, l'objectif est de fournir au concepteur une estimation de la fabricabilité. Cette évaluation se doit d'être la plus robuste possible, en ce sens, elle doit s'appuyer sur des indices de difficultés de fabrication. Nous allons donc définir plusieurs indices, pour les procédés par enlèvement de matière (usinage grande vitesse) et pour les procédés par ajout de matière. La méthodologie développée fournira donc automatiquement au concepteur les données suivantes : d'une part, les valeurs des indices pour l'outillage, et d'autre part les cartographies de distribution de ces valeurs suivant les différentes zones de l'outillage. Le chapitre suivant présente en détail les différents indices définis pour évaluer la complexité de fabrication.

Ensuite, la méthodologie propose une double approche, modulaire et hybride, afin de définir une décomposition en modules qui optimise la fabricabilité de l'outillage. Nous avons vu, dans la troisième partie, les multiples avantages d'une conception modulaire (ainsi que les contraintes, liées à l'assemblage des modules). Nous focaliserons dans ces travaux sur le développement de l'aspect modulaire dans le but de réduire la complexité de fabrication. Dans le cas où un seul procédé de fabrication est retenu, notre approche méthodologique de la modularité est originale et novatrice. Dans le cas où nous envisageons une fabrication hybride (c'est-à-dire combinaison optimale des procédés par ajout et enlèvement de matière), il est nécessaire de tenir compte des dernières avancées en matière de fabrication rapide afin d'intégrer au mieux ces procédés par rapport à l'usinage.

Enfin, afin de quantifier le gain résultant de ces approches modulaires et hybrides, il est primordial de disposer de points de comparaisons précis entre la conception monobloc traditionnelle et la conception modulaire hybride proposée. Nous développerons alors un ensemble de critères de comparaison, basée une nouvelle fois sur l'évaluation de la complexité de fabrication.

Chapitre 3

Analyse de complexité de fabrication

Dans ce chapitre, nous allons présenter nos travaux relatifs à l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication. Il s'agit de mettre en place les différents indices qui vont servir à estimer la complexité de fabrication des outillages, qu'ils soient réalisés par ajout ou enlèvement de matière. Ces indices composent la pierre angulaire de la méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides.

Nous allons donc, dans une première partie, définir concrètement ce que nous entendons par l'expression « complexité de fabrication ». Plusieurs propositions d'interprétation existent dans la littérature, nous exposerons celles que nous retenons pour notre application. Nous verrons également qu'une analyse précise de la complexité de fabrication requiert une double approche : globale et locale.

L'analyse locale consiste à étudier l'outillage non plus dans sa globalité, mais parties par parties. Il est donc nécessaire de choisir une définition convenable des parties constituant notre outillage. Les décompositions par entités, très répandues pour ce genre d'application, présentent trop de contraintes pour pouvoir être utilisées dans notre méthodologie. Nous avons donc exploité un autre type de décomposition, les décompositions en octree. Cela est présenté dans la deuxième partie.

Les troisième et quatrième parties sont constituées par la définition des indices de complexité de fabrication, locaux et globaux. Ces indices s'appuient sur des études bibliographiques des différents paramètres de conception des pièces qui influencent directement la complexité de fabrication. Cette étude est présentée dans la troisième partie, et les indices dans la quatrième.

Enfin, une synthèse de l'approche est proposée dans la cinquième partie.

1. Comment définir la complexité de fabrication ?

1.1. Études bibliographiques

1.1.1. Avant-propos

La notion de complexité englobe tant de situations différentes qu'il est difficile de la définir de manière unique. Les théories de la complexité sont donc multiples, et font souvent référence à des notions de philosophie délicates à appréhender dans le cadre d'une thèse en génie mécanique. Nous pensons notamment aux travaux épistémologiques de J.L. Le Moigne, qui développe la Théorie du système général – Théorie de la modélisation [LEM77] et fait la distinction entre « complication » et « complexité » ou ceux d'E. Morin, qui s'intéressent au paradigme de la complexité [MOR86].

Nous nous cantonnons donc à des notions plus accessibles de la complexité, avec un lien avec notre domaine de recherche. Nous étendrons cependant les explorations des définitions à quelques autres domaines dans lesquels un éclaircissement de l'idée de complexité était fourni afin de proposer, dans une partie suivante, notre propre explication des termes « complexité de fabrication ».

1.1.2. Les travaux de l'Intelligent Manufacturing Systems Center

Au sein de l'IMS Center (université de Windsor, Canada), W.H. ElMaraghy a travaillé sur la modélisation et l'évaluation de la complexité de fabrication. Ses travaux mettent en avant trois types de complexités à considérer [ELM03] [ELM05] [ELM04] :

- La complexité de produit, liée au matériau, à la forme et aux spécifications ;
- La complexité de procédé, liée au produit, à la quantité à fabriquer et à l'environnement de travail (qui comprend le type de machine, le dispositif de montage et de serrage de la pièce, les outillages, les moyens de mesure, etc) ;
- La complexité opérationnelle, liée au produit, au procédé et à la gestion des opérations de production (mesure des performances, l'ordonnancement, etc).

Dans notre cas, nous cherchons à développer une évaluation de la complexité dès la phase de conception. En ce sens, nous ne pouvons retenir que la complexité de produit, puisque les deux autres types de complexité nécessitent une analyse aboutie de la gamme de fabrication.

Ses travaux révèlent également que la complexité augmente avec, d'une part, le nombre et la diversité des entités à fabriquer, assembler et tester et, d'autre part, le nombre et le type d'opérations ainsi que les efforts nécessaires pour produire les entités. Ainsi, les différents facteurs qui interviennent dans la complexité sont représentés sur la Figure 30.

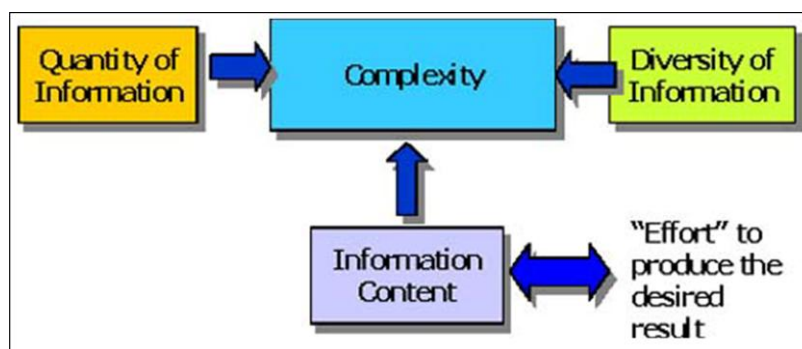


Figure 30. Les différents facteurs intervenant dans la complexité [ELM03].

La difficulté majeure émanant de l'évaluation de la complexité de fabrication devient l'évaluation de « l'effort nécessaire pour produire la pièce ». Cet effort peut être déterminé grâce à une échelle du type : « bas » - « moyen » - « haut niveau d'effort », correspondant alors à des valeurs de facteur de complexité de 0 - 0,5 - 1.

1.1.3. Les travaux de S.Y. Yang

Avec cette notion d'effort présenté dans le paragraphe précédent, la complexité est vue comme la difficulté de création des formes, d'obtention des caractéristiques attendues et de réalisation des tolérances spécifiées, reprenant ainsi la définition de S.Y. Yang [YAN03]. Il propose une évaluation de la complexité des pièces en matériau composite. Les données sont issues du modèle CAO de la pièce, il s'agit d'un fichier STL, c'est-à-dire un maillage surfacique par des triangles. La complexité Φ est déterminée par la relation suivante :

$$\Phi = \frac{\sum_i \theta_i L_i}{\sum_k \theta_k L_k}$$

θ_i correspond à l'angle entre les vecteurs normaux de deux triangles adjacents du fichier STL de la pièce, L_i est la longueur de leur arête commune. θ_k et L_k sont les paramètres équivalents pour un cube ayant une surface extérieure de même aire que la pièce.

La valeur ainsi déterminée sert de constante de base pour optimiser le volume de fibre du matériau composite en minimisant le temps de fabrication et le coût et en maximisant la résistance.

Il s'agit là d'une estimation purement géométrique de la complexité, nous ne sommes alors pas dans le cas de la complexité de fabrication puisque les procédés de fabrication n'interviennent absolument pas dans cette définition.

1.1.4. La complexité selon N.P. Suh

N.P. Suh a développé de nombreuses études sur la complexité en ingénierie (conception, fabrication, assemblage, etc). Il précise que chaque domaine propose une vision différente de la complexité qui satisfasse ses besoins car il n'y a pas d'unité dans les concepts et théories [SUH05]. Il distingue notamment la complexité du domaine physique, qui est une caractéristique inhérente au système, produit ou algorithme concerné, de la complexité du domaine fonctionnel, qui est une mesure du degré de l'incertitude de la satisfaction des exigences fonctionnelles. Ainsi la complexité physique augmente avec le nombre de pièces composant un système, ce qui n'est pas forcément le cas de la complexité fonctionnelle. Par la suite, ses travaux se concentrent sur la complexité fonctionnelle en définissant plusieurs types de complexités, qui correspondent à la relation entre l'étendue des exigences (*design range*) et l'étendue du système (*system range*) pour des spécifications fonctionnelles (*FR* : *Functional Requirement*), comme le montre la Figure 31.

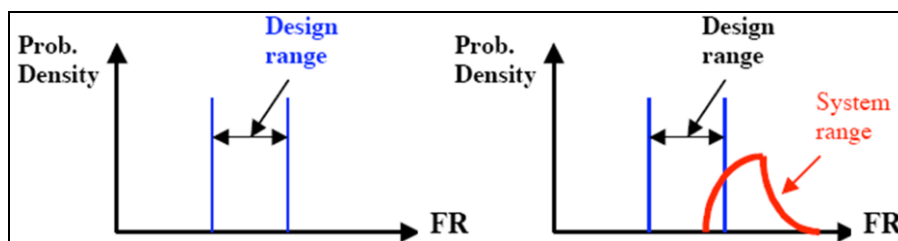


Figure 31. La complexité comme relation entre *design range* et *system range* [SUH05].

Il existe une division entre complexité indépendante ou dépendante du temps, suivant que le domaine du système varie au cours du temps ou non.

Dans le cas de la complexité indépendante du temps, il y a deux catégories : la complexité réelle et la complexité imaginaire. La première correspond à une étendue du système complètement à l'extérieur de l'étendue des exigences. Dans le domaine de la production, cela reviendrait donc à une inadéquation entre la capacité du système et les exigences de conception. La seconde est liée à un manque de connaissance ou de compréhension. L'exemple convaincant est celui d'un cadenas verrouillé par un code. Pour celui qui ne connaît pas le code, l'opération d'ouverture du cadenas est très complexe, alors qu'elle ne l'est plus du tout pour celui qui a le code. Il s'agit là de la notion de complexité imaginaire, indépendante du temps.

Et enfin, la complexité dépendante du temps (illustrée par la Figure 32) est également divisée en deux catégories, combinatoire ou périodique, suivant que les événements qui induisent le déplacement de l'étendue du système apparaissent de façon imprévisible ou correspondent à un nombre fini et limité de combinaisons possibles.

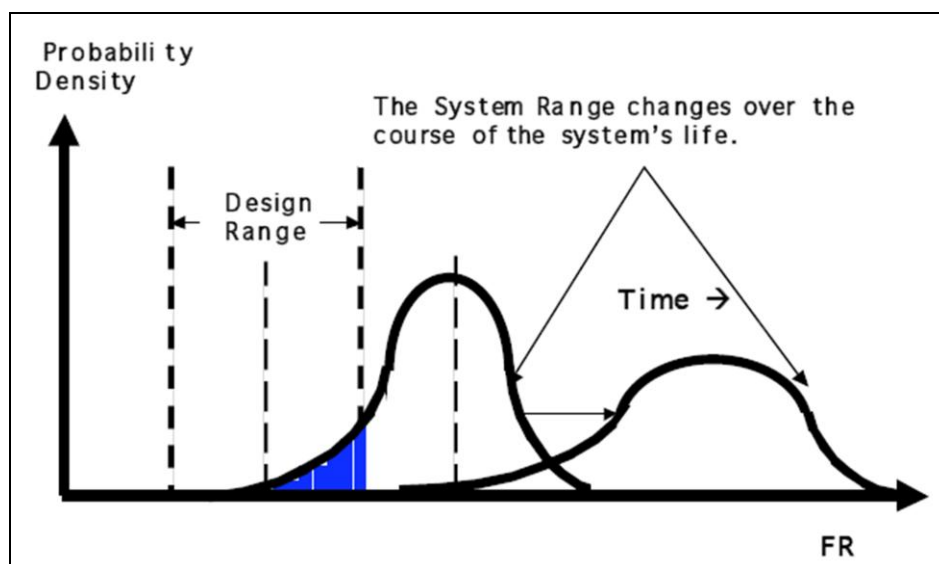


Figure 32. Déplacement de l'étendue du système au cours du temps : Complexité dépendante du temps [SUH05].

1.1.5. Les travaux du LURPA

En France, le Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée a mené des études visant à définir la difficulté de fabrication pour les pièces de formes complexes usinées (dans une application aux outillages de forge) [TAP08] [TAP07a] [TAP07b]. Le point de départ est l'analyse des écarts entre les conditions de coupe programmées et réelles : non respect de la vitesse d'avance, variation importante de l'engagement outil, non respect de la vitesse de coupe. Ainsi, la préparation de l'usinage doit permettre d'élaborer des parcours limitant ces écarts. Pour cela, un outil d'aide à l'identification des zones d'usinage critiques vis-à-vis des conditions de coupe a été développé. Cette identification est basée sur un ensemble de cartographies du modèle CAO de la pièce construit selon des critères issus des difficultés d'usinage. Dans ces travaux, deux types de difficultés d'usinage sont analysées : la position de la zone de contact outil/pièce et la pertinence d'une direction d'enchaînement de surfaces avec des processus d'usinage classiques.

1.1.6. Les travaux intégrant une approche hybride

Lors de travaux sur le concept MCP menés par notre équipe de recherche, la définition d'un facteur de faisabilité permet de tenir compte de la difficulté de réalisation d'une pièce par un procédé défini (usinage grande vitesse, électroérosion ou frittage sélectif de poudre métallique). Ce facteur de faisabilité est calculé pour toutes les entités composant l'outillage en utilisant la logique floue. Il s'appuie sur trois types d'entrées qui sont :

- Les paramètres constructifs qui décrivent la géométrie de l'entité ;
- Les paramètres de tolérancement qui font intervenir les différents intervalles de tolérances ;
- Les matériaux.

Une base de règles formalisant le savoir des experts des procédés est implémentée dans un contrôleur flou et permet de disposer des valeurs des facteurs de faisabilité, et de connaître les variations de ces valeurs en fonction des données d'entrées. La Figure 33 illustre les variations du facteur de faisabilité pour l'usinage d'une cavité rectangulaire en fonction des variations de deux des paramètres constructifs, le rayon du congé en fond de cavité et l'angle de dépouille des parois. La plage de variations est représentative de la difficulté à obtenir par usinage une poche avec un faible angle de dépouille et un faible rayon de fond, surtout lorsque les dimensions de la poche sont serrées. Une valeur du facteur de faisabilité plus faible témoigne d'une plus grande difficulté de réalisation.

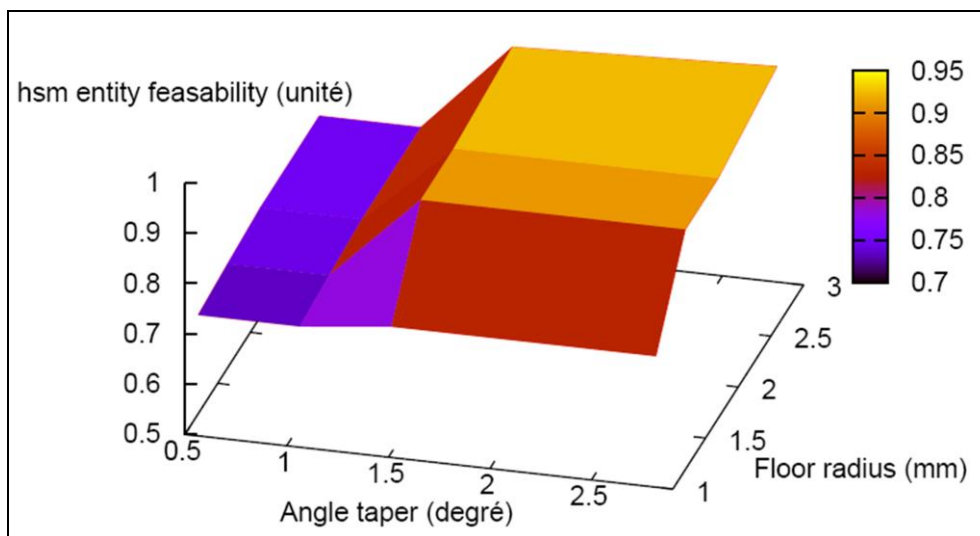


Figure 33. Variations du facteur de faisabilité lors des variations des paramètres constructifs pour une cavité rectangulaire [GIL06].

Les facteurs de faisabilité ainsi définis permettent, en association avec un indice de temps ou de coût de fabrication basé sur le volume de l'entité, d'obtenir des estimateurs de temps et de coût pour chaque entité composant l'outillage et pour les différents procédés considérés. Ces estimateurs adimensionnels servent à la comparaison des procédés.

Cette approche est particulièrement intéressante dans notre cas d'étude. En effet, ils permettent de disposer d'informations pertinentes sur les comparaisons de procédés par ajout et enlèvement de matière. La prise en compte de données issues de la définition géométrique, des spécifications et des matériaux des entités constituent une base de réflexion utile pour définir les paramètres influençant la faisabilité d'une entité. Néanmoins, les désavantages subsistent, principalement liés à la nécessité d'associer ce facteur aux différentes entités de fabrication constituant l'outillage étudié. Nous verrons

en effet par la suite l'importance de s'écarter d'une représentation par entités de fabrication dès lors que la finalité de l'application concerne plusieurs procédés. De plus, le renseignement de la base de règles n'est pas des plus aisés compte tenu de la quantité de règles nécessaires, mais influence grandement la qualité du facteur et son temps de calcul.

1.1.7. Les travaux intégrant une approche modulaire

Nous citons, dans le chapitre précédent, une étude économique qui intègre des calculs de complexité de fabrication et d'assemblage (Figure 19) [TSA99]. Dans cette étude, la complexité de fabrication est calculée à partir du nombre de modules d'une part (plus il y a de modules, plus ils seront simples à réaliser) et d'un facteur de faisabilité d'autre part. Ce facteur de faisabilité est déterminé en tenant compte du rapport entre les possibilités techniques des technologies de fabrication et les attentes du concepteur, en détaillant l'analyse fonctionnelle par fonction. Les résultats de l'étude ne sont pas directement exploitables pour une transposition à notre application car ils restent trop théoriques.

Une étude récente de S.M. Selhieh analyse la fabricabilité des produits modulaires sous trois aspects [SAL08] :

- La complexité de produit (représentée par la variable PC), liée à la modélisation fonctionnelle du produit ;
- La diversité des composants (représentée par la variable CD), liée à la modélisation physique du produit ;
- La difficulté de la gamme de fabrication (représentée par la variable SD), liée à la modélisation du processus de réalisation du produit.

La complexité de produit PC se calcule avec la relation suivante :

$$PC = \sum_{j=1}^l F_j j$$

F_j est le nombre de fonctions au niveau j que le produit doit respecter et l est le nombre de niveaux. Ce calcul est lié à une représentation par niveaux de l'analyse fonctionnelle du produit. Sont distinguées les fonctions primaires (fonctions principales) et secondaires (esthétisme, fiabilité, etc.), elles peuvent être décomposées en sous-fonctions. Un exemple est fourni sur la Figure 34.

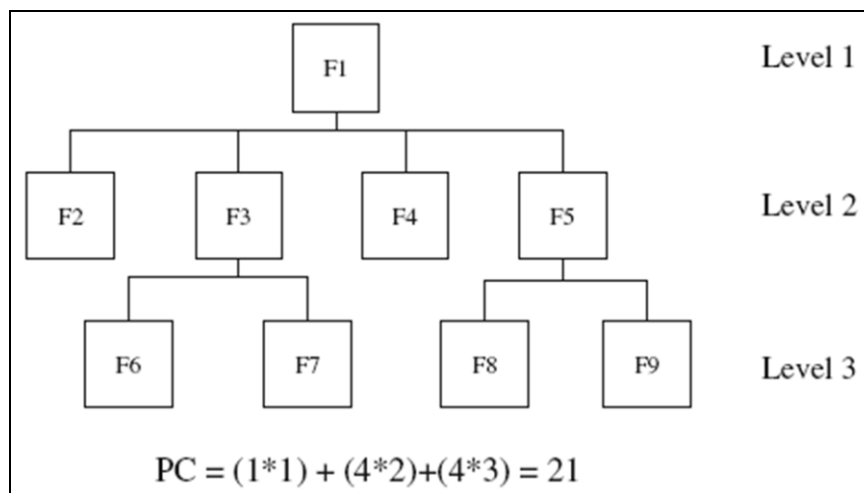


Figure 34. Représentation par fonctions et calcul de complexité d'un produit [SAL08].

La diversité des composants CD se calcule avec la relation suivante :

$$CD = \frac{u}{N}$$

u est le nombre de composants (modules) uniques et N le nombre total de composants.

La difficulté de la gamme de fabrication SD se calcule avec la relation suivante :

$$SD = \frac{\sum_{i=1}^N X_i R_i}{N}$$

$X_i = 1$ si l'opération i est utilisée plus d'une fois, et 0 si elle est utilisée une seule fois. R_i est le nombre de fois que l'opération i est utilisée et N est le nombre total d'opérations nécessaires pour réaliser le produit.

Ces relations mathématiques définissant la complexité de fabrication des produits modulaires sont intéressantes, puisqu'elles sont basées sur une représentation issue de l'analyse fonctionnelle du produit (donc applicables en phase de conception du produit) et qu'elles font intervenir le nombre de modules. En revanche, elles nécessitent une définition précise de la gamme de fabrication (pour le calcul de SD), ce qui n'est pas compatible avec notre souhait de disposer d'une évaluation des difficultés de fabrication dès la phase de conception.

1.1.8. D'autres définitions de la complexité

Afin de nous aiguiller dans notre création d'indices de complexité, nous avons également étudié d'autres domaines dans lesquels la complexité est définie.

Par exemple, la complexité du point de vue de la physique s'explique par le nombre de parties élémentaires (particules, atomes, petits ions et petites molécules) et l'indépendance du mouvement entre ces parties. Tant qu'on considère un solide comme un corps parfaitement rigide, toutes les parties le composant ne sont pas indépendantes. En revanche, il n'en va pas de même pour un fluide en mouvement car chaque partie peut avoir un mouvement différent des autres. Dans ce cas, les parties sont dites indépendantes, non pas parce qu'elles n'interagissent pas entre elles, mais parce que la connaissance de l'état d'une partie ne fournit peu ou pas d'informations sur l'état des autres parties [WIK]. Ce type de définition de la complexité peut nous aider à élaborer notre définition. En effet, il semble intéressant de prendre en compte le nombre de modules (de parties élémentaires) composant un outillage modulaire afin de pénaliser un outillage décomposé en multiples modules. Dans le même esprit, une définition de la complexité des systèmes de production est définie par analogie avec la mécanique des fluides en mouvement [EFT09]. Ces travaux, menés par l'université de Patras en Grèce, cherchent à définir un indice de complexité en s'inspirant du nombre de Reynolds, nombre adimensionnel qui sépare en deux types le régime d'un fluide en mouvement (turbulent ou laminaire). Ainsi, la complexité des systèmes de production est vue comme une séparation entre un régime laminaire (constant, régulier) et un régime turbulent (complexe). Cependant, ces travaux n'en sont qu'aux prémices et aucune application significative n'a été présentée.

La complexité est définie de manière multiple dans beaucoup de domaines. En théorie des graphes, on distingue notamment la complexité statique cyclomatique (nombre de « trajets » entre les états du graphe), la complexité statique géographique (nombre d'étapes figurant dans le graphe) ainsi que différentes complexités dynamiques. En musicologie, la définition de la complexité d'une œuvre

musicale est de trois niveaux : complexité algorithmique (en représentant schématiquement l'œuvre par un graphe puis en appliquant des calculs de complexités liés à la théorie des graphes), complexité du résultat sonore (mesure de la quantité d'information qu'il transporte), et enfin la complexité au niveau perceptif, qui reste relative à la culture et au comportement de l'auditeur [LEV04].

Tout cela indique la nécessité d'une définition de la complexité de fabrication claire et parfaitement adaptée à notre besoin, donc originale.

1.2. Notre définition de la complexité de fabrication

À la lueur des analyses bibliographiques précédentes, nous fournissons la proposition suivante d'explication des termes « complexité de fabrication » :

La complexité de fabrication d'une pièce est liée aux paramètres de conception (géométriques, dimensionnels, choix de matériaux, définitions des spécifications) qui en influencent le temps, le coût ou la qualité de réalisation pour un procédé de fabrication donné. Elle est mesurée grâce à des indices de complexité de fabrication calculés à partir de ces paramètres de conception.

Nous pouvons noter qu'avec cette définition, aucune restriction n'est émise quant au domaine d'utilisation ni aux procédés de fabrication retenus. Cependant, nous restons axés, dans ces travaux, à la fabrication d'outillages par ajout et enlèvement de matière.

Cette définition permet donc d'évaluer la fabricabilité dès la phase de conception de l'outillage, respectant ainsi l'exigence résultant des analyses du chapitre précédent qui impose de ne pas dépendre d'une phase de préparation de la fabrication coûteuse en temps et en ressources.

Deux actions restent donc à mener :

- La définition des paramètres de conception qui vont avoir un impact direct sur le temps, le coût ou la qualité de fabrication, dans le cas d'un procédé par enlèvement de matière ou par ajout de matière ;
- La création d'indices de complexité de fabrication, déterminés à partir de ces paramètres, qui donnent une image quantifiée du degré de difficulté de réalisation de l'outillage en fonction du procédé retenu.

1.3. Analyse globale / Analyse locale

Le but de notre méthodologie est de proposer une conception modulaire hybride d'outillages afin d'en réduire la complexité de fabrication. Il est donc nécessaire de baser la méthodologie sur une analyse très fine de la fabricabilité, c'est-à-dire que nous devons disposer d'une vision très détaillée et quantifiée des difficultés de fabrication des outillages. En effet, le choix d'un procédé de fabrication peut être influencé par des détails géométriques de faibles dimensions (par exemple, un rayon de courbure d'une surface concave, qui, s'il est trop petit, va pénaliser très fortement une réalisation par usinage).

En conséquence, nous devons impérativement développer une analyse détaillée de l'outillage afin de connaître le degré de complexité de fabrication de chaque zone de l'outillage. Pour ne citer qu'un seul exemple, nous pouvons définir un indice de complexité de fabrication en considérant les rayons de courbures de chaque surface. Ainsi, des valeurs différentes de cet indice seront observées au sein de

l'outillage suivant la valeur du rayon de courbure de la surface. Plus le rayon est faible, plus la difficulté de fabrication par usinage sera élevée, jusqu'à une limite technico-économique acceptable pour l'usinage. Il s'agit donc bien d'une analyse locale car les valeurs de l'indice varient suivant les différentes zones (les différentes surfaces) de l'outillage.

En revanche, ce type d'analyse zone par zone de l'outillage ne suffit pas. Il faut également considérer l'outillage dans sa globalité puisque des paramètres globaux de l'outillage (son volume, l'encombrement maximal suivant une direction) vont également avoir un impact fort sur le temps, le coût et la qualité de fabrication. Là encore, nous ne citerons qu'un exemple simple. Un indice de complexité de fabrication par ajout de matière va être défini à partir du volume de l'outillage, puisque le volume à fabriquer influence directement le temps de réalisation dans le cas d'une technologie additive. Cette fois-ci, l'indice n'est plus associé à une zone ou une surface de l'outillage, mais bien à l'outillage dans sa globalité. On parle alors d'analyse globale.

La pertinence de la double vision – locale et globale – se retrouve également dans les travaux relatifs aux analyses de l'accessibilité et de la géométrie de l'outil de coupe dans le cas de l'usinage. En effet, le choix d'une géométrie d'outil de coupe (en particulier, le choix de son rayon) est déterminé par les analyses conjointes locale et globale [WAN07] [DIN04b] [RIS97]. Le but étant de définir un outil compatible avec la forme de la surface à réaliser (analyse locale) et dont l'encombrement ne provoque pas de collisions avec les autres surfaces de la pièce lors des trajectoires d'usinage (analyse globale). Ce type de problématique existe aussi dans d'autres domaines, comme le procédé de scanning laser de surfaces de formes complexes, qui peut être utilisé à des fins de reconstruction de modèles géométriques de pièces réelles (*reverse engineering*) ou de mesure sans contact [ELB98].

Dans le cas des analyses locales, il faut judicieusement partitionner le modèle CAO de l'outillage étudié en zones. Quelle méthode de décomposition est la plus adaptée à notre application ? La partie suivante apporte les éléments de réponse nécessaires.

2. Méthodes de décomposition d'un modèle CAO

2.1. L'approche par entités

2.1.1. Introduction

La première fois qu'a été mentionnée l'approche par entités est probablement dans les travaux de L.K. Kyprianou [KRY80], en 1980. Le concept d'entités de fabrication apparaît en 1982, dans les travaux de F. Arbab, qui mettent en avant la similitude entre les opérations booléennes utilisées pour représenter un modèle numérique en CSG (*Constructive Solide Geometry* : représentation d'objets solides par combinaison d'objets solides simples) et l'usinage par enlèvement de matière qui consiste à retirer des entités simples à la pièce brute [ARB82]. Depuis les années 1990, le concept d'entités (*features*) a abondamment été adopté comme représentation pour aider la conversion de données de conception en instructions de fabrication. Le groupe GAMA (Gamme automatique) a explicité le concept d'« entités d'usinage » de la façon suivante [GAM90] : « Une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu. ». Ce concept a notamment été utilisé dans un objectif de génération de gammes d'usinage [VIL03]. On retrouve dans cette définition la combinaison d'informations géométriques et de données techniques issues du procédé de fabrication. Cette alliance de données, provenant conjointement de la géométrie et du procédé de réalisation, est la base de toutes les utilisations des approches par entités.

2.1.2. Utilisations classiques des approches par entités

Le point de départ de l'utilisation d'une approche par entités est la représentation par entités de fabrication du modèle CAO du produit. Pour cela, il existe deux techniques : l'extraction qui consiste en la reconnaissance d'entités à partir d'une représentation numérique du produit (par exemple B-rep ou représentation cellulaire [BID98]), et la conversion qui se base sur une conception du produit en entités de conception, ces entités étant converties en entités de fabrication [HUA06]. Dans les deux cas, il est nécessaire de créer, au préalable, la base de données contenant les entités de fabrication qui vont être utilisées.

Dans les travaux de J. Dong, un panorama des premières techniques d'extraction et de reconnaissance d'entités est dressé (1980-1995). L'objectif principal est d'automatiser la gamme de fabrication à partir d'un modèle CAO décomposé judicieusement en entités d'usinage [DON97a] [DON97b]. Les recherches sur les méthodes d'extraction d'entités à partir d'une modélisation 3D sont encore nombreuses à l'heure actuelle, comme en témoignent les travaux d'E. Brousseau [BRO08]. Certaines études, comme celles de L. Chen [CHE02] ou de Z. Huang [HUA06], définissent les entités à partir d'une géométrie de pièce finie et utilisant la notion de volume balayé par l'outil de coupe.

Les entités d'usinage (du type poches, trous, etc) facilitent, au niveau de la FAO, l'automatisation de la définition de la direction d'approche, du choix des outils de coupe [MAR00b], de la trajectoire d'usinage, etc pour ces formes simples. Des approches par entités peuvent également être utilisées pour automatiser le choix de la position des éléments de fixation d'une pièce dans un porte-pièce [TSE97].

Certaines applications spécifiques nécessitent la définition d'une base de données contenant des entités plus riches, la définition des entités va donc pouvoir s'enrichir pour aboutir à des entités plus complexes. Par exemple, le Laboratoire Conception, Fabrication et Commande de l'ENSAM de Metz

a travaillé à l'élaboration d'entités de trous complexes [ETI06]. Y.S. Kim a proposé un système de reconnaissance d'entités pour des pièces usinées à partir de bruts moulés [KIM02]. Des entités d'usinage pour des formes complexes imposant l'utilisation de machines 4 ou 5 axes ont été définies (des exemples sont présentés sur la Figure 35), mais leur reconnaissance n'est pas encore automatisée et requiert une délicate approche interactive entre l'utilisateur et le système [WAI09].

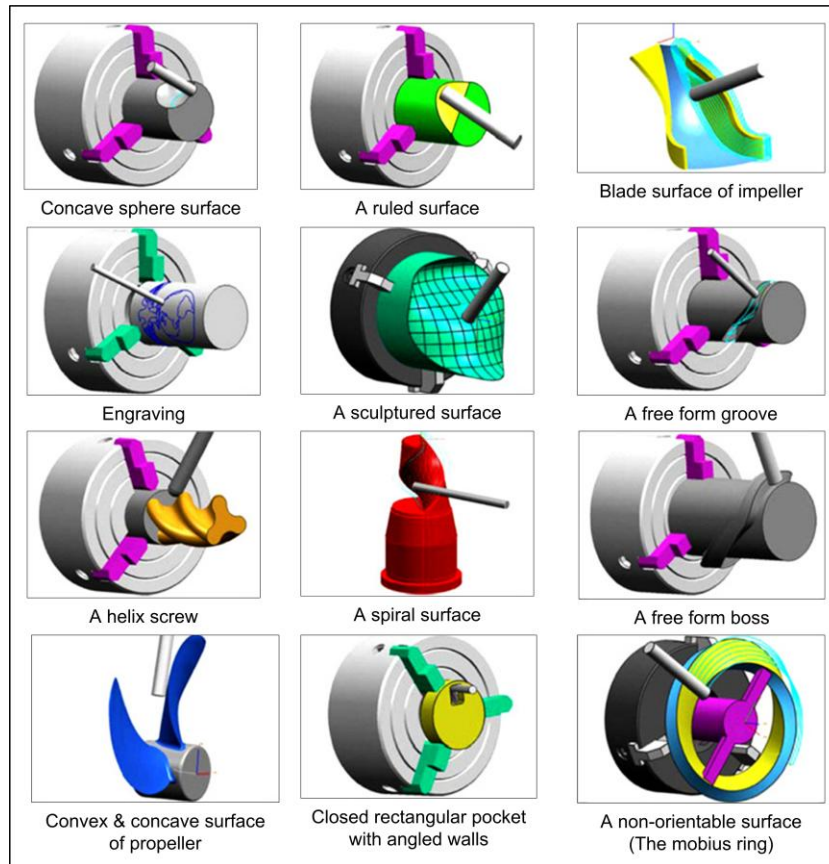


Figure 35. Exemples d'entités d'usinage 5 axes [WAI09].

La décomposition d'un modèle CAO en entités de fabrication va pouvoir simplifier une analyse de fabricabilité. Notamment en ce qui concerne l'extraction des caractéristiques géométriques des pièces servant de base à une estimation de la fabricabilité, comme c'est le cas pour des pièces destinées à être réalisées par moulage [CHE03] [KAI01]. Pour ce type de pièces, l'analyse de la direction de démoulage et du nombre de noyaux peut être simplifiée en utilisant une décomposition en entités spécifiques aux procédés de fonderie [DIS97]. Pour d'autres procédés de fabrication, d'autres entités sont définies afin de réaliser une analyse des contraintes de fabrication. C'est le cas, par exemple, des procédés de compression de poudres [DIS96], ou des procédés de soudage MIG MAG pour lesquels O. Legoff a développé des entités intégrant les trajectoires des cordons de soudage ainsi que les caractéristiques métier indispensables au choix des paramètres opératoires [LEG95].

Une approche par entités va également pouvoir faciliter les analyses par simulation numérique. Dans ce cas, la décomposition en entités va être enrichie par la suppression d'entités de plus petites dimensions afin d'accélérer le temps de calcul, en éliminant les entités dont les dimensions sont faibles par rapport aux dimensions globales de la pièce [LI02]. De plus, les décompositions de modèles géométriques en entités permettent également une représentation aisée par graphes dans laquelle

peuvent apparaître les relations entre entités, comme cela est montré dans les travaux de C.X. Feng [FEN96b] et dans ceux de M. Rivette [RIV07c].

2.1.3. Inconvénients majeurs

Un certain nombre de désagréments subsistent dans ces approches par entités.

Premièrement, tout système de définition d'entités est limité par le nombre d'entités effectivement explicitées dans la base de données. Ainsi, les multiples possibilités offertes par les usinages sur machines 4 ou 5 axes ne peuvent pas réellement être prises en compte avec des entités d'usinage simples, car, de façon générale, la plupart des approches par entités sont limitées à des applications d'usinage 3 axes [BAL00]. Dans le cas où des portions de la pièce ne correspondent à aucune entité renseignée dans la base de données, aucune information ne peut être utilisée pour ces portions. Cela pose évidemment problème lorsque sont réalisées des décompositions en entités pour évaluer la fabricabilité des différentes zones d'outillages, puisqu'il existerait alors des zones non évaluées.

Deuxièmement, la conception par entités de fabrication n'est pas directement réalisable avec les logiciels de CAO classiques. À l'heure actuelle, il est encore nécessaire de passer par une étape d'extraction ou de conversion d'entités. L'interprétation automatique de données CAO en entités de fabrication n'a pas encore été significativement implémentée dans des activités industrielles réelles [RAH06]. En outre, les méthodes de conversion vont fournir une solution de décomposition en entités parmi la multitude d'alternatives possibles, mais la définition de la solution optimale n'est pas aisée. À titre d'exemple, la Figure 36 propose la décomposition en entités d'une pièce pour laquelle deux alternatives sont possibles : soit deux rainures repérées 5 et 6, soit une seule rainure repérée 8.

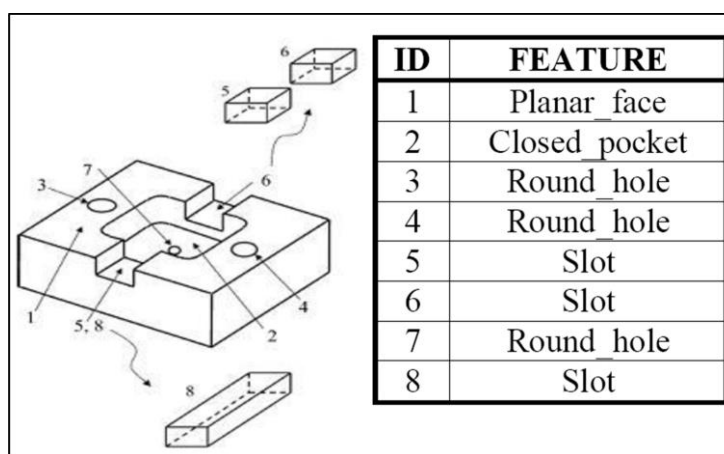


Figure 36. Non unicité de la décomposition en entités [SUH03].

Troisièmement, à partir du moment où les entités de fabrication dépendent du procédé de fabrication retenu, différentes applications vont nécessiter différentes bases de données d'entités. Dans le cas où la conception est définie avant le choix définitif du procédé, une conception par entités va faire appel à une autre catégorie d'entités, les entités de conception, qui seront distinctes des entités de fabrication. On aboutit alors à une multiplication des modèles de représentations, ce qui est évidemment néfaste à cause de la perte d'informations et du passage rarement bijectif d'une représentation à une autre.

Les dernières avancées au niveau de la norme STEP [NEW08] cherchent à gommer ces inconvénients, en proposant une décomposition unique de la pièce quelle que soit l'étape de développement de la pièce considérée (conception, préparation de la fabrication, fabrication, contrôle,

etc). En revanche, cette norme ne permet toujours pas de disposer de bases de données d'entités correspondantes aux procédés par ajout de matière, seules sont définies des entités issues du fraisage et du tournage [ISO01]. Ainsi, certaines particularités topologiques des pièces ne peuvent pas être prises en compte puisque non réalisables par des procédés conventionnels de fraisage ou de tournage. C'est le cas notamment des canaux de refroidissement conformes représentés sur la Figure 37, qui forme des structures internes complexes dans le but respecter une distance constante entre les canaux et la surface extérieure [SAI07].

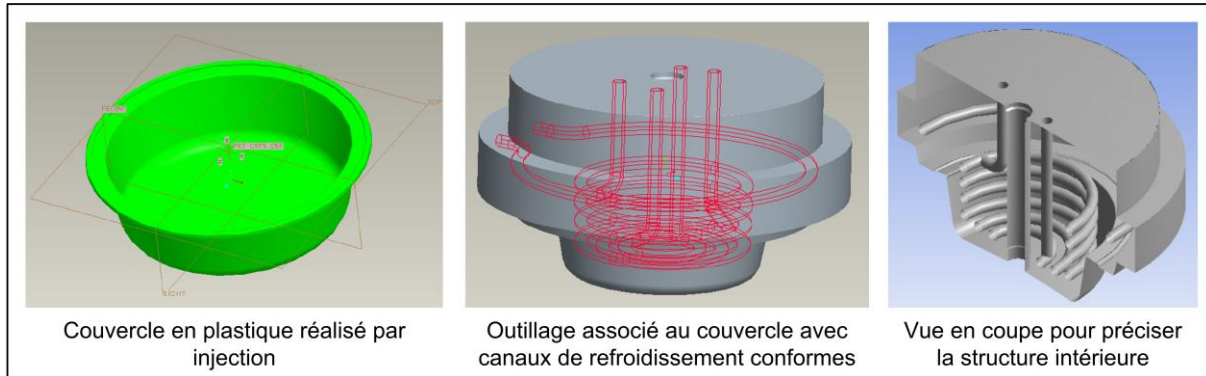


Figure 37. Exemple de canaux conformes qui ne sont pas identifiables pour une représentation par entités STEP [SAI07].

L'intérêt de développer des entités de fabrication par ajout de matière pour enrichir la norme STEP d'une composante « fabrication rapide » a été mis en avant il y a une dizaine d'années [PRA02]. Les travaux actuellement menés à l'IRCCyN par R. Bonnard ont pour objectif de développer un nouveau modèle de données STEP pour la fabrication rapide, en définissant, entre autres, de nouvelles entités [BON08b] [BON09].

2.1.4. Synthèse sur les approches par entités

Pour résumer, il n'y a aucun doute sur le fait que le concept d'entités ait permis une avancée majeure dans l'automatisation de la préparation de la fabrication. En revanche, les approches par entités ne sont pas exemptes d'inconvénients et trop de contraintes subsistent à l'heure actuelle pour que nous puissions baser notre analyse de complexité de fabrication locale sur une décomposition en entités. Nous allons donc étudier dans les paragraphes suivants les autres types de décompositions des modèles CAO pour trouver la plus adaptée à nos besoins. Devant leur multiplicité, nous avons choisi d'en présenter les principaux, puis de lister leurs avantages et inconvénients au regard de notre application.

2.2. Le format STL

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, le format d'échange actuel entre le logiciel de CAO et la machine de fabrication par ajout de matière est le format STL. Dans cette partie, nous cherchons à savoir si une représentation au format STL est adaptée pour notre démarche.

Le format STL, acronyme initialement tiré de *STereoLithography* (désormais le nom STL se rattache à *Surface Tessellation Language* ou *Standard Triangulation Language* [DAN08]), a été établi en 1987 par 3D Systems et développé par Albert Consulting Group [KUM97]. Il s'agit d'une représentation par triangles des surfaces d'un modèle numérique en trois dimensions. Ce type de

représentation est basé sur un algorithme standard de triangulation de surface souvent utilisé lors d'analyses par éléments finis depuis les années 1970. La fréquente utilisation de ce format provient de son principal avantage, qui est l'approximation par triangles simple, robuste, fiable et facilement contrôlable comparativement aux approximations polygonales par exemple. Ainsi, le tranchage en couches est facilité par ce format. C'est ce qui a fait de ce format d'échange le standard actuellement utilisé pour la préparation de la fabrication avec des technologies additives (choix de l'orientation, tranchage, création de supports, etc), bien que de nouveaux formats de données aient été étudiés pour pallier les inconvénients du format STL [BAR98].

Notons que le format STL n'est pas réservé uniquement au domaine des technologies additives, puisque L. Tapie utilise ce format comme point d'entrée pour sa cartographie de la position de la zone de contact outil de coupe / pièce [TAP07b]. En effet, chaque facette du modèle STL possède l'attribut de direction de la matière (par l'orientation de la normale à la facette), ce qui correspond à l'information nécessaire à l'analyse du type de contact outil de coupe / pièce. L'élaboration d'une cartographie par échelle de couleurs permet de visualiser les zones de la pièce usinée avec un même type de contact, en colorant les facettes du modèle STL de la pièce.

Les limites de ce format se trouvent principalement dans la précision de la décomposition, qui est directement liée à une erreur de flèche spécifiée. En effet, comme le montre la Figure 38, la triangulation ne fait qu'approximer une surface courbe, la tolérance d'approximation étant appelée « erreur de flèche » et pouvant être contrôlée lors de la conversion du modèle CAO au format STL.

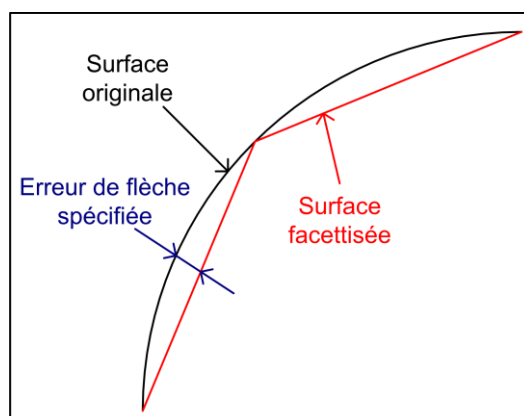


Figure 38. Tolérance d'approximation (erreur de flèche).

Donc la simplicité de triangulation qui a engendré l'utilisation massive de ce format se retrouve, en contrepartie, à la base des inconvénients de ce type de décomposition. Outre la perte d'information due à la simplification par triangulation de la pièce, d'autres données précisées lors de la création du modèle CAO ne se retrouvent plus dans les facettes STL. Il s'agit notamment de la définition du matériau, de la texture, de la couleur, ainsi que des précisions sur les tolérances dimensionnelles, géométriques et les états de surface attendus.

En conséquence, nous ne retenons pas le format STL pour notre analyse locale des difficultés de fabrication. En effet, il est nécessaire que nous nous appuyions sur une définition exacte de la topologie de l'outillage étudié. Cela est dû au fait que des variations de faibles dimensions peuvent avoir un impact sur le choix de procédé de fabrication, et donc ces variations doivent être détectées. Dans le cas d'une représentation par format STL, cela impliquerait de spécifier une erreur de flèche extrêmement petite, ce qui aurait pour conséquence une augmentation considérable du nombre de facettes et donc du temps de traitement.

Nous ne pouvons donc pas baser l'analyse locale sur un format STL, il faut trouver un modèle qui respecte l'exactitude morphologique de la CAO de l'outillage de départ. De plus, le STL étant une approximation des surfaces du modèle CAO, et la fabrication par ajout de matière une fabrication de volumes, il ne semble pas adéquat de baser une analyse de complexité de fabrication par ajout de matière sur ce format. De fait, nous excluons tous les autres types de décompositions surfaciques de modèles CAO pour nous consacrer à l'étude des décompositions volumiques. Dans la partie suivante, nous allons alors étudier d'autres méthodes de décompositions volumiques de modèles CAO.

2.3. Autres types de décompositions volumiques de modèles

2.3.1. Travaux dans le domaine informatique

Des algorithmes de décompositions de modèles numériques 3D en différentes parties ont été étudiés dans le domaine de l'informatique. Comme il est délicat de prétendre à l'exhaustivité de l'analyse de ces travaux, nous allons simplement présenter une de ces méthodes de décomposition et analyser ses caractéristiques afin de déterminer si elle peut éventuellement être utilisée pour réaliser l'analyse locale de complexité de fabrication.

Il s'agit des travaux de J.L. Mari, qui étudie les modes de représentation des objets 3D complexes et le contrôle des propriétés topologiques, morphologiques et géométriques des objets [MAR02]. Il met également en avant la nécessité de représenter un objet, une forme, sous des aspects globaux et des points de vue locaux. Le premier type d'approche détermine la structure de l'objet en ne laissant qu'une faible considération aux phénomènes surfaciques. Le second type d'approche autorise un contrôle précis de la frontière de l'objet, mais néglige souvent la vision plus large que l'on se doit d'attendre. En ce sens, cette double approche rejoint nos travaux qui mettent en avant l'importance de disposer d'une double vision (globale et locale) pour définir la complexité de fabrication. Il distingue alors différentes représentations : le squelette interne, correspondant à une analyse globale, et la couche externe correspond à une analyse locale des frontières de la pièce, les deux étant reliés par une couche de transition. Un exemple est fourni sur la Figure 39.

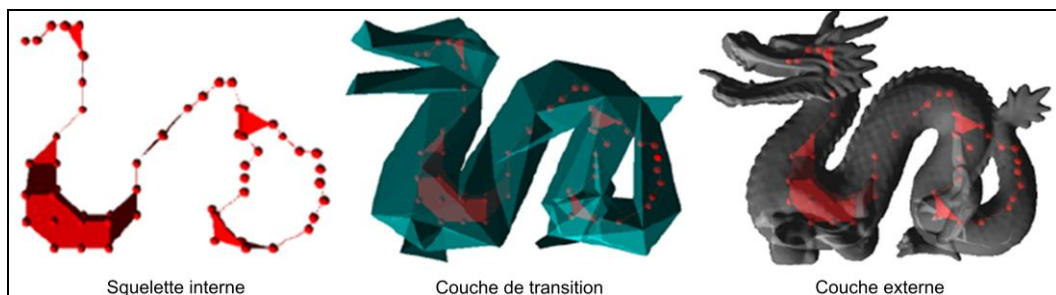


Figure 39. Modèle à trois couches du dragon [MAR02].

Cette méthode de décomposition, en squelette interne, couche de transition et couche externe pourrait être intéressante pour notre application. En effet, nous pourrions envisager d'associer à chaque nœud du squelette interne des valeurs d'indices de complexité de fabrication, en nous appuyant sur la structure de la pièce et sur les spécificités surfaciques observées sur la couche externe. Néanmoins, les algorithmes à mettre en œuvre pour réaliser la décomposition en trois couches d'un modèle CAO sont complexes à développer et nous ne sommes pas allés plus loin dans cette voie dans le cadre de ces travaux de thèse, car cela aurait sans doute nécessité une programmation délicate pour représenter, dans un logiciel de CAO, un modèle numérique d'outillage en trois couches.

2.3.2. Décomposition de modèles adaptée à la Stratoconception

Nous analysons dans ce paragraphe les travaux d'Y. Houtmann, relatifs à la décomposition de modèles CAO pour le procédé de Stratoconception [HOU07]. Ces travaux, réalisés au CIRTES, concernent la décomposition de pièces en vue de faciliter leur réalisation par Stratoconception, en analysant des concepts issus du monde de la géométrie analytique. Ainsi ces travaux présentent une classification des différentes décompositions géométriques de modèles (décompositions en entités ou en tranches). À titre d'exemples, les différentes méthodes étudiées sont :

- Les méthodes utilisant les squelettes, comme celle présentée dans le paragraphe précédent ;
- Les méthodes par approximations surfaciques : le modèle est décomposé en plusieurs plans qui partitionnent la surface ;
- Les méthodes utilisant les volumes convexes, principalement utilisées dans la reconnaissance d'entités ;
- Les méthodes de décompositions par morceaux en se fondant sur l'accessibilité de chaque partie ;
- Les méthodes utilisant les voxels.

Nous allons développer la dernière méthode citée, car il s'agit d'une décomposition volumique donc potentiellement utilisable pour notre application.

Un voxel est l'équivalent d'un pixel en trois dimensions. Le découpage de l'espace par des voxels se fait de manière récursive jusqu'à ce qu'on atteigne un critère d'arrêt fixé, comme par exemple la dimension minimum des voxels. La classification primaire des voxels les répartit en voxels blancs (complètement en dehors du modèle), noirs (complètement à l'intérieur du modèle) ou gris (sur la frontière surfacique du modèle).

Le principal intérêt de cet outil repose dans la notion de classification secondaire, utilisée au LURPA il y a une dizaine d'années [OST02], qui permet de donner des attributs supplémentaires aux voxels gris. L'un des exemples qui est fourni consiste à associer à chaque voxel gris le vecteur normal au plan des moindres carrés issu des points contenus dans le voxel. Cela est utilisé dans une application d'évaluation de la qualité géométrique de mesures sans contact de surfaces complexes [CON02]. Dans notre cas, nous pouvons envisager d'associer à chaque voxel gris un indice de complexité de fabrication et disposer alors d'une vision locale de la complexité de fabrication pour la portion de l'outillage contenue dans chaque voxel, ce qui correspond à ce que nous souhaitons. Un autre avantage des décompositions en voxels est que les opérations booléennes entre modèles sont aisées à calculer.

L'inconvénient majeur de cet outil est sa consommation mémoire. En effet, la représentation d'une pièce de dimensions maximales 400 mm x 400 mm x 400 mm nécessite 64 000 000 voxels de dimensions 1 mm x 1 mm x 1 mm. Si on se contente de coder ceux-ci sur 3 octets (position en x, y et z) sans leur affecter d'autres attributs, la quantité mémoire utilisée s'élève à 1 536 000 000 bits [HOU07] ! Pour atténuer ce problème, il est possible d'utiliser une représentation par octree qui optimise le codage de l'emplacement d'un voxel. Il s'agit d'une division de l'espace qui s'adapte à la géométrie du modèle. Les décompositions octree sont étudiées en détail dans la partie suivante.

2.4. La décomposition octree

2.4.1. Historique et principe détaillé

La représentation par octree a été développée en 1980, lorsque les avancées technologiques ont nécessité de plus en plus de représentations d'objets en trois dimensions visuellement efficaces et d'algorithmes associés pour la manipulation, l'analyse et la visualisation de ces objets. D. Meagher a été l'un des pionniers du concept, en étendant à la troisième dimension la structure de quadtree, développée pour des applications de visualisations d'images [MEA82]. Les premières formulations du principe de quadtree sont probablement dues à A. Klinger [KLI76], mais la désignation sous ce terme n'apparaît que quelques années plus tard dans les travaux de G.M. Hunter [HUN79].

Afin d'exposer simplement le principe détaillé d'une décomposition octree, nous avons opté pour une décomposition en deux dimensions (quadtree) de la forme présentée sur la Figure 40.

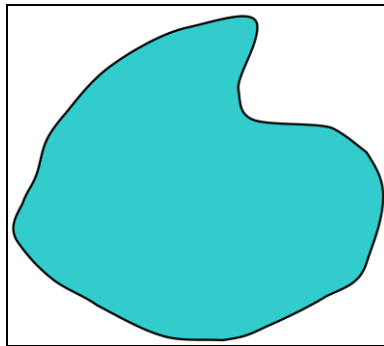


Figure 40. Forme à décomposer.

L'étape initiale de la décomposition consiste à définir le niveau 0 de la décomposition. Il s'agit de la cellule, carrée ou rectangulaire (cubique ou parallélépipédique en trois dimensions), qui englobe la totalité de la forme à décomposer. Cette cellule, qui compose la racine de la décomposition, est nommé « Octant 0 » pour la suite, elle est présentée sur la Figure 41. Des algorithmes de détermination de la cellule de volume minimal englobant une forme en trois dimensions peuvent se trouver dans les travaux de C.K. Chan [CHA04], mais nous n'en avons pas tenu compte pour notre exemple illustratif.

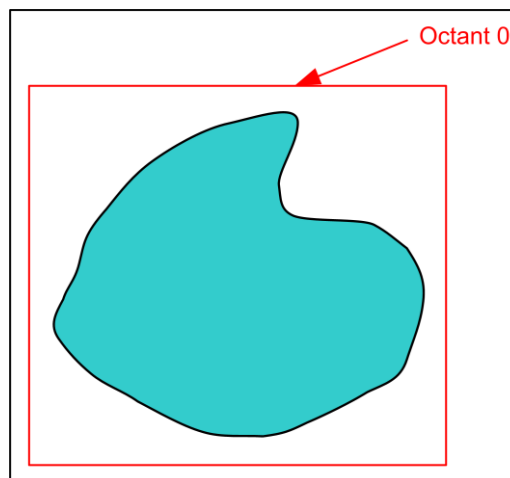


Figure 41. Niveau 0 de la décomposition.

La création du niveau 1 de la décomposition s'opère par une subdivision de l'octant 0 en 4 cellules, repérées « Octant 1 » à « Octant 4 » sur la Figure 42. Bien évidemment, une extension à la troisième dimension implique une décomposition en 8 cellules (oct-tree en 3D / quad-tree en 2D). L'ordre de numérotation des octants est important puisqu'il permet de connaître facilement la position et les dimensions d'un octant uniquement avec son identifiant numérique. Les octants sont numérotés dans un ordre défini à l'avance, pour les octrees, traditionnellement de 0 à 7 [MEA82]. Dans notre cas de quadtree, nous avons choisi de nous appuyer sur la notation proposée par I. Gargantini [GAR82]. Cependant, nous optons pour une numérotation de 1 à 4, au lieu de 0 à 3, afin de nous affranchir de certaines contraintes liées à une éventuelle confusion entre des octants de différents niveaux, par exemple, numéro 0021 (niveau 4) et numéro 21 (niveau 2). L'ordre de numérotation est donc :

- Octant 1 au Nord-Ouest ;
- Octant 2 au Nord-Est ;
- Octant 3 au Sud-Ouest ;
- Octant 4 au Sud-Est.

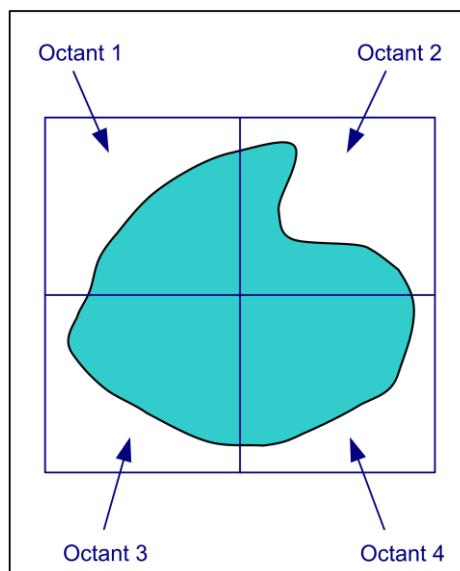


Figure 42. Niveau 1 de la décomposition.

Ensuite, comme cela était expliqué succinctement pour les voxels, une classification des octants est réalisée en leur associant un attribut de couleur :

- L'octant est blanc s'il est complètement à l'extérieur de la forme ;
- L'octant est noir s'il est complètement à l'intérieur de la forme ;
- L'octant est gris s'il est à la frontière.

Pour notre exemple, tous les octants du niveau 1 sont gris. Le processus de subdivision s'opère alors sur les octants gris. En effet, une décomposition supplémentaire des octants blancs et noirs n'apporterait pas plus d'information sur la forme. C'est donc là la différence avec une décomposition en voxels. Le processus de décomposition, représenté par l'algorithme de la Figure 43, s'arrête lorsque tous les octants sont blancs ou noirs, ou lorsque le niveau de décomposition maximal souhaité est atteint. Ce niveau souhaité représente alors la précision de la décomposition et peut être déterminé soit par une valeur fixée à l'avance (n_{\max} niveaux de décomposition) ou par une dimension minimale des octants (décomposition jusqu'à ce que la dimension de la plus grande arête des octants soit inférieure à x mm).

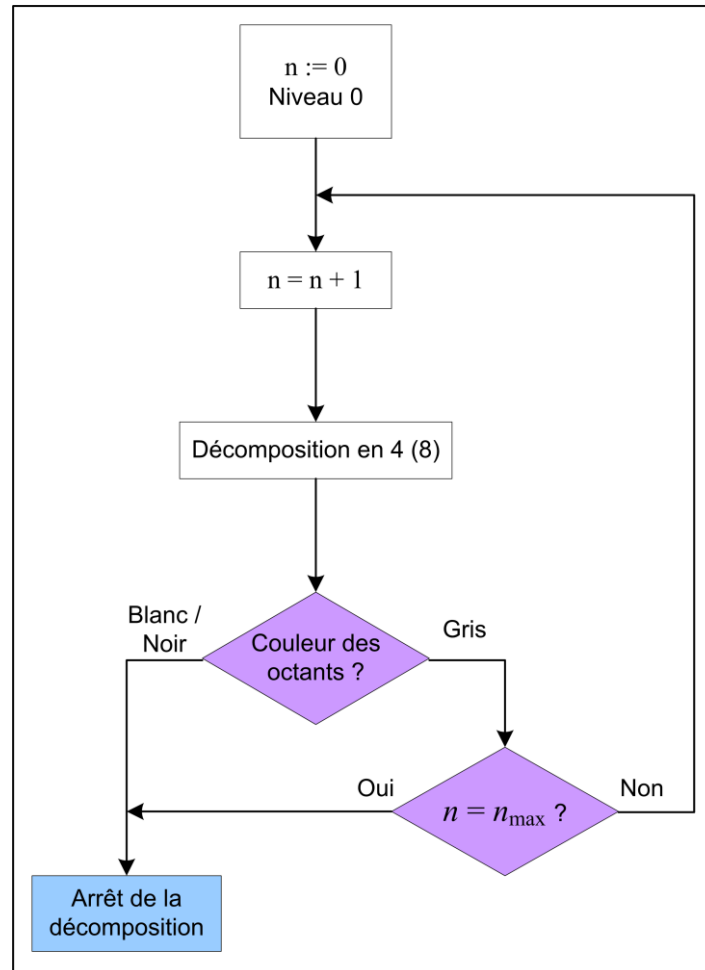


Figure 43. Algorithme de décomposition quadtree (octree).

Les décompositions quadtree aux niveaux respectifs 2, 3 et 4 de la forme étudiée sont présentées sur la Figure 44.

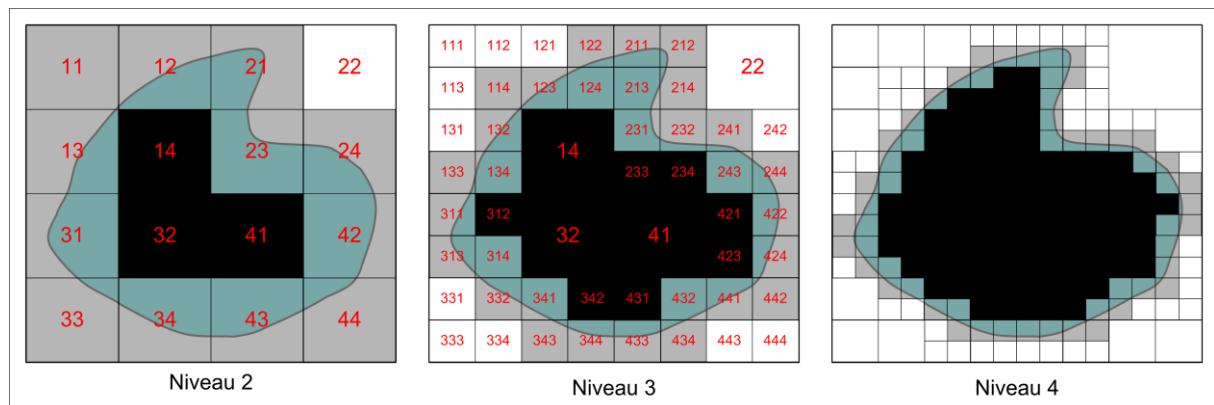


Figure 44. Niveaux 2, 3 et 4 de la décomposition.

La décomposition octree se représente classiquement sous forme d'un arbre, le niveau 0 composant la racine, les octants sont les nœuds et les octants gris sont décomposés en 8 branches. En guise d'illustration, nous avons réalisé sur la Figure 45 la représentation par arbre jusqu'au niveau 2 de la décomposition quadtree de notre forme servant d'exemple. Par la suite, nous ne réutiliserons plus cette

façon de représenter les octree, car elle est principalement utilisée pour faciliter les opérations booléennes sur les octree, ce qui ne concerne pas directement notre application.

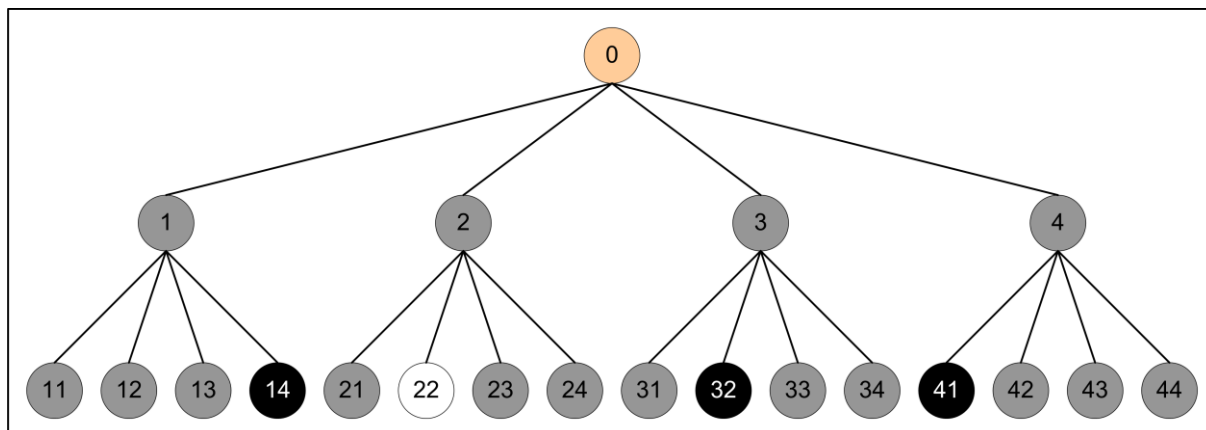


Figure 45. Représentation par arbre de la décomposition en quadtree au niveau 2.

Quelques pistes d'améliorations à ce concept d'octree ont été étudiées dans les années 1990, avec notamment la définition des *face octrees* [JUA95] et des *extended quadtrees* [LIU96] pour lesquels les octants contiennent d'autres informations que la simple classification Noir – Blanc – Gris.

Avec les décompositions octree, les manipulations d'objets sont très faciles : opérations booléennes (union, intersection, différence) et opérations géométriques (translation, rotation, agrandissement, réduction) se réduisent à des manipulations d'octants, donc d'objets très simples (cubes ou éventuellement parallélépipèdes). C'est pourquoi les représentations par octree ont été utilisées dans différents domaines et pour diverses applications.

2.4.2. Exemples d'applications

L'une des premières applications des décompositions octree concerne la mesure de la complexité géométrique des produits. En effet, la complexité d'un objet peut se voir intuitivement comme la quantité d'information nécessaire à la représentation de l'objet. Ce qui peut donc se quantifier facilement par le nombre de nœuds composant l'arbre octree [MEA82].

Dans le domaine du génie mécanique, les applications courantes des décompositions octree concernent la simulation de programmes d'usinage pour machines à commande numérique. Du fait de la simplicité des algorithmes d'opérations booléennes (du type intersection) sur des représentations par octree, la simulation d'usinage pour estimer les dimensions des pièces obtenues [LIU96] ou pour la détection des collisions [DIN04b] peut être facilitée par l'utilisation de ce type de représentation [ROY99] [ROY98] [KIM98] [KIM06].

Par extension, la robotique est également devenue un champ d'application pour le concept d'octree, avec, pour ne citer qu'eux, des travaux effectués à l'IRCCyN concernant la recherche de singularités et des domaines d'unicité pour des manipulateurs parallèles [CHA98a] [WEN98] [WEN97].

Dans le domaine de la fabrication par ajout de matière, nous avons relevé trois applications du concept d'octree. A.K. Sridharan a développé un algorithme pour optimiser la trajectoire du laser qui vient flasher chaque couche pour le procédé LOM [SRI01]. À chaque couche, le laser doit balayer l'ensemble de la zone de travail plane et le pas de balayage n'est pas constant mais varie suivant une décomposition quadtree de la zone de travail. Cela permet alors de diminuer le temps de parcours pour les parties de la couche non conservées comme le montre la Figure 46.

Le concept d'octree a également été utilisé pour réaliser la structure intérieure de pièces réalisées par FDM (dépôt de fil fondu). En effet, T.W. Lam parvient à diminuer le volume (et par conséquent le temps de fabrication) d'une pièce avec une structure intérieure non plus pleine, mais constituée par les arêtes issues d'une décomposition octree [LAM97]. La Figure 47 illustre ces travaux, avec une pièce dont le gain en temps et en coût de fabrication est d'environ 45 % par rapport à la même pièce avec une structure pleine [LAM98].

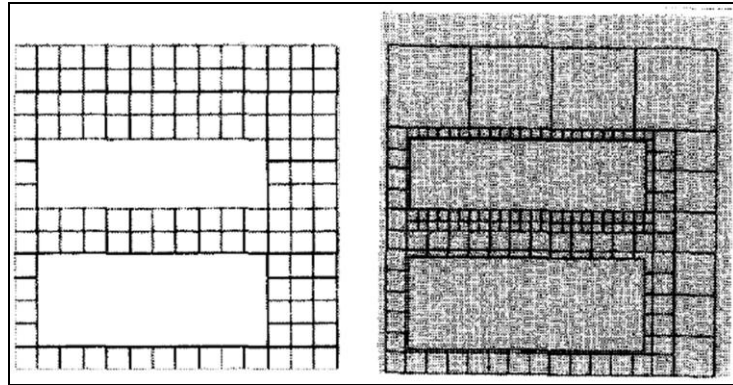


Figure 46. Pas de balayage constant (à gauche) et variable (à droite) suivant une décomposition de type octree [SRI01].

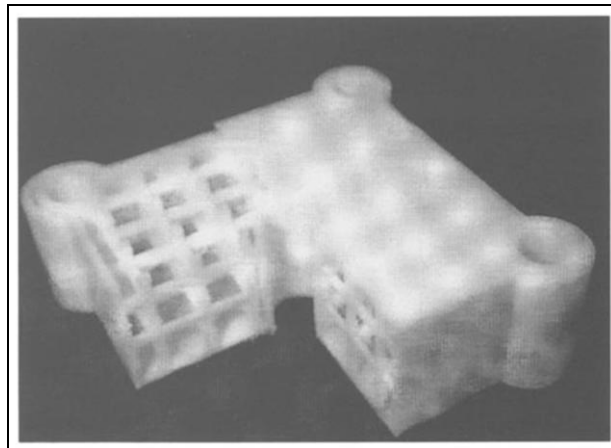


Figure 47. Exemple d'une pièce avec une structure interne de type octree [LAM98].

Enfin, le dernier exemple à notre connaissance d'utilisation du concept d'octree pour une application en fabrication par ajout de matière provient de l'université Heriot-Watt d'Édimbourg. Il s'agit de réaliser un prototype par assemblage de cubes, de différentes tailles, afin de produire un brut qui sera usiné en phase finale. Ainsi, comme cela est présenté dans la Figure 48, le modèle 3D est décomposé en octants cubiques, et cette décomposition sert de base à la fabrication du prototype.

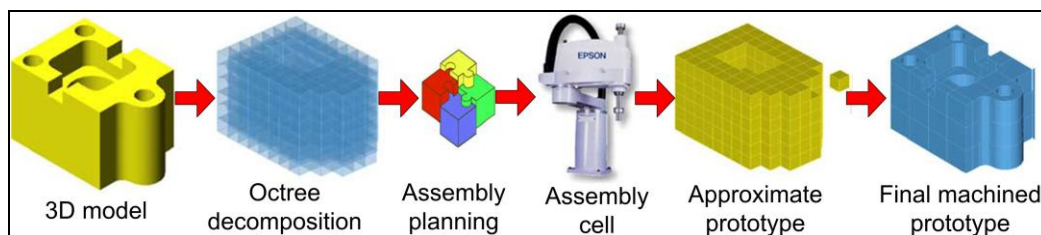


Figure 48. Vue générale de la méthode de fabrication de prototypes à partir d'une décomposition octree [MED06].

D'autres applications des décompositions octree existent, comme par exemple :

- La représentation de surfaces avec textures et couleurs pour des jeux vidéo [LEF05] ;
- La modélisation de l'environnement de travail dans une exploitation minière [JIA96] ;
- La reconstruction de modèles numériques 3D à partir de nuages de points issus de procédés de scanning [AZE04] ;
- L'imagerie médicale [IBA95] ;
- Les analyses par éléments finis, comme dans le logiciel Catia, où les éléments composant le maillage sont issus d'une décomposition octree ;
- Etc.

2.5. Choix de la décomposition octree pour l'analyse locale

En conclusion de cette partie, nous utiliserons pour l'analyse locale de la complexité de fabrication d'un outillage une décomposition octree du modèle CAO de celui-ci. Les différents avantages de l'utilisation d'une décomposition en octree pour notre application sont listés dans le Tableau 3, les inconvénients sont relevés dans le Tableau 4.

Avantages	
Neutralité	La décomposition ne dépend pas de la façon dont la géométrie est définie, ni du logiciel de CAO avec laquelle elle a été créée, ni du procédé de fabrication envisagé (ajout ou enlèvement de matière)
Unicité	Aucune ambiguïté sur la décomposition
Exactitude	En conservant les fractions de l'outillage contenues dans chaque octant gris, la décomposition prend en compte tout le volume de l'outillage, et pas uniquement sa surface, sans approximation
Précision	La précision de la décomposition augmente avec la complexité géométrique locale
Facilité d'accès	Le numéro de l'octant suffit pour connaître sa position et ses dimensions

Tableau 3. Avantages de l'utilisation d'une décomposition octree.

Inconvénients	
Consommation mémoire	Une grande capacité mémoire est toujours nécessaire pour stocker tous les octants créés
Implémentation	La procédure de décomposition octree n'existe pas sur le marché de la CAO, il faut donc entièrement la développer informatiquement

Tableau 4. Inconvénients de l'utilisation d'une décomposition octree.

Ainsi, nous analyserons la complexité de fabrication de la fraction de l'outillage contenu dans chaque octant gris. En associant alors à chacune de ces fractions des indices de difficultés de fabrication (définis dans la partie suivante), nous sommes en mesure de déterminer quelles zones sont les plus délicates à fabriquer au regard d'un procédé défini. En ce sens, nous nous appuyons sur la classification secondaire initiée par le LURPA [OST02] [CON02]. De plus, cela va nous permettre d'améliorer la précision de l'analyse de complexité de fabrication locale pour les zones qui le

nécessitent. Pour ce faire, nous définissons le concept d'OSD (Octants qui doivent être Sous-Décomposés). En fonction de la valeur des indices de complexité de fabrication que nous associerons à chaque octant gris, nous pourrions savoir pour quels octants gris une décomposition au niveau supérieur (dans le cas où $n < n_{\max}$) va permettre d'améliorer la vision de la complexité de fabrication localement. Nous posons alors la définition suivante :

Les OSD (Octants qui doivent être Sous-Décomposés) sont les octants gris pour lesquels un nouveau niveau de la décomposition octree va permettre d'améliorer la précision de l'évaluation locale de la complexité de fabrication.

Nous modifions alors l'algorithme de décomposition octree de la Figure 43 afin d'y intégrer ce concept d'OSD. Cet algorithme (Figure 49) sera valable pour toutes les décompositions octree nécessaires aux calculs des indices locaux.

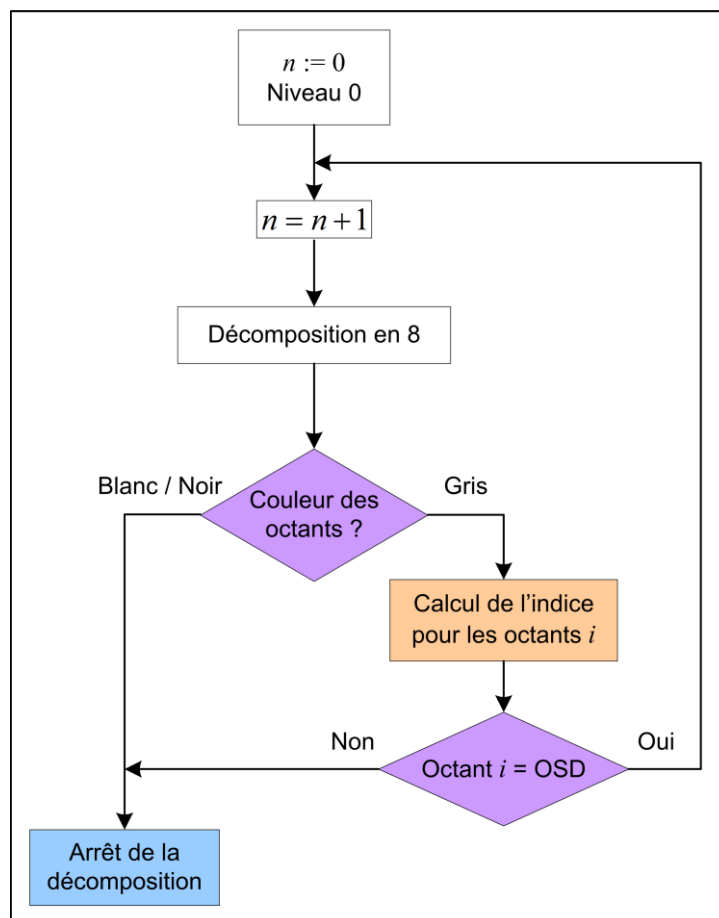


Figure 49. Algorithme de décomposition octree modifié.

L'étape suivante consiste donc en la définition des indices de complexité de fabrication. À la vue de la définition de la complexité de fabrication que nous avons proposée dans la première partie de ce chapitre, il est nécessaire de définir les paramètres de conception des outillages qui impactent directement le temps, le coût ou la qualité de fabrication de ces outillages. C'est là précisément l'objet de la partie suivante.

3. Paramètres à prendre en compte pour calculer la complexité de fabrication

3.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons faire une synthèse des paramètres des outillages qui vont intervenir dans le calcul des indices de complexité de fabrication. Il s'agit donc des données d'entrée de l'analyse de complexité de fabrication. Compte tenu de ce qui a été exposé précédemment, nous souhaitons des données :

- Accessibles à partir du modèle CAO de la pièce, ne dépendant donc pas de la phase de préparation de la fabrication ;
- Induisant un temps de fabrication élevé, augmentant le coût, ou rendant plus délicat l'obtention d'un haut niveau de qualité.

Ces paramètres vont être définis à partir d'analyses bibliographiques et ils sont différents selon que l'on se place dans un contexte de fabrication par ajout de matière ou par usinage. En effet, les difficultés et les limites ne sont pas les mêmes pour l'usinage que pour la fabrication rapide. Nous allons donc lister et classer les paramètres à prendre en compte pour calculer la complexité de fabrication, d'abord pour une réalisation par usinage, puis pour une réalisation avec des techniques additives. Nous avons également exploré d'autres cas, notamment la définition de paramètres induisant de la complexité pour des applications de moulage afin de disposer d'une vision la plus complète possible des paramètres de conception qui engendrent de la complexité de fabrication.

3.2. Cas de la fabrication par usinage

Pour commencer, nous déterminons quelles sont les données d'entrée nécessaires aux systèmes d'aide à la réalisation de gammes de fabrication. Nous nous focalisons sur les données dépendant de la pièce à usiner et laissons de côté celles qui concernent spécifiquement les moyens de production (machine, outils, etc).

Pour COMPASS (Computer Oriented Materials, Processes, and Apparatus Selection System), qui est un système de sélection automatique des process et des machines-outils [CHA98b], les données d'entrée pour la réalisation d'un trou cylindrique sont : le diamètre et sa tolérance, la profondeur, la cylindricité, une spécification d'état de surface, les dimensions et le matériau du brut, la quantité de pièces à usiner. Pour une application au domaine de l'outillage, la quantité de pièce à usiner est généralement de une.

VITool est un système développé par l'université de Durham (Royaume-Uni) dont l'objectif est de choisir les outils de coupe en utilisant un minimum de données et de fournir suffisamment d'informations pour estimer le temps de fabrication [MAR00b] [MAR00a]. Ce système est basé sur une décomposition en entités, la première donnée d'entrée est alors le type d'entité : trou ou poche (fermée ou ouverte telle une rainure). Nous retrouvons ensuite le même genre de paramètres que dans le système précédent : position et dimensions de l'entité, spécifications d'état de surface. Une nouvelle composante vient cependant s'ajouter à la liste : les directions d'approches possibles.

Les analyses de directions d'approches d'un outil de coupe pour une surface donnée sont à la base de différentes méthodes d'aide à la fabrication. Par exemple, les travaux de D. Ki qui cherchent à

décomposer des pièces en différentes parties en groupant les zones qui ont les mêmes directions d'usinage possibles [KI02].

Bien évidemment, nous retrouvons dans tous ces systèmes un point de départ commun qui est la géométrie de la pièce à usiner. Mais celle-ci peut être décrite par des entités ou bien directement par la définition mathématique des surfaces composant la pièce. C'est notamment le cas dans les travaux de B.K. Choi, relatifs à la simulation d'usinage de cavités de moules [CHO97] [CHO99].

Il existe également des exemples dans lequel la géométrie de la pièce dont on cherche à déterminer la complexité est décrite par un fichier STL, comme c'est le cas pour des pièces en composite [YAN03]. De plus, les travaux de L. Tapie définissent des difficultés d'usinage en prenant en considération notamment l'angle entre la direction de la surface (déterminé à partir de l'attribut de direction matière issu du fichier STL) et la direction de l'axe outil [TAP07b], les difficultés d'usinage correspondant alors à des variations dans la valeur de cet angle, donc à des modifications de la courbure de la pièce.

Les rayons de courbure sont des paramètres primordiaux dans des cas de formes complexes. En effet, pour ce type de formes, souvent utilisées dans la conception d'outillages, les paramètres qui sont à prendre en compte pour choisir un outil sont, selon les travaux de G. Sun, la courbure minimum, les rayons de coin, les distances entre les parois, les profondeurs maximales ainsi que la rugosité et les exigences de tolérances [SUN01].

À un certain degré, la précision peut dépendre du matériau de la pièce à usiner ou de l'état du matériau après traitement thermique. Les matériaux plus difficiles à usiner en termes d'efforts de coupe nécessiteront habituellement plus d'attention pour obtenir une précision spécifiée [KER06].

Dans l'étude de J. Vivancos [VIV04], les données d'entrée nécessaires à l'établissement de conditions de fabrication sont mises en avant. Il s'agit, une nouvelle fois, de la géométrie et du matériau de la pièce ainsi que des spécifications géométriques.

En partenariat avec l'entreprise Renault, l'IFMA de Clermont-Ferrand a travaillé sur la capitalisation des connaissances métiers pour la génération de gammes d'usinage de grande série. Les contraintes de fabrication qui sont prises en compte relèvent notamment de paramètres issus de spécifications géométriques (cylindricité, localisation, parallélisme, rectitude, etc.) [SAB02].

Nous retenons enfin divers travaux récents dans lesquels ont été mises en place des évaluations de la fabricabilité. Il s'agit tout d'abord de ceux de S.K. Ong, qui présentent des *Manufacturability indexes* (MI) [ONG03]. Les paramètres qui sont pris en compte sont de trois sortes : les données géométriques (formes et dimensions), la mise et le maintien en position de la pièce et les exigences de précision.

Quant aux travaux de M. Korosec, ils détaillent la construction d'indices de difficulté d'usinage pour des surfaces de formes complexes. Ils prennent en compte la complexité géométrique de la pièce, ainsi que les tolérances dimensionnelles, géométriques, de localisation et l'état de surface [KOR05].

Nous connaissons alors les paramètres définis lors de la conception qui sont à prendre en compte pour la création d'indices de complexité de fabrication par usinage. Nous classifions ces paramètres selon trois catégories :

- Ceux appartenant à la morphologie de la pièce, c'est-à-dire regroupant des aspects géométriques et dimensionnels ;
- Ceux faisant référence à des informations de spécifications ;
- Ceux liés à la définition du matériau.

3.3. Cas de la fabrication par ajout de matière

Intéressons-nous désormais à la fabrication par ajout de matière. De façon similaire à ce que nous avons fait pour l'usinage, nous cherchons à classifier les paramètres influençant la complexité de fabrication.

Pour commencer, nous analysons les systèmes d'aide au choix de procédés de fabrication par ajout de matière pour en extraire les données d'entrée. Ces données, lorsqu'elles correspondent à des paramètres liés directement à la conception de la pièce, vont nous servir à définir des indices de complexité de fabrication. En effet, ce qui influence le choix d'un procédé peut concerner notre définition de la complexité de fabrication.

Dans les travaux de H.S. Byun, un système de sélection d'un procédé de fabrication rapide est développé [BYU05]. Les paramètres qui interviennent dans le choix sont la précision dimensionnelle, l'état de surface, certaines caractéristiques mécaniques du matériau (résistance à la traction et allongement), ainsi que le coût et le temps de fabrication maximaux souhaités.

Dans un contexte de développement de moules d'injection, l'Indian Institute of Technology de Bombay propose un outil informatique de sélection de procédés d'outillages rapides [NAG08] [PAL07]. L'objectif est de mettre en regard l'évaluation de la fabricabilité d'une pièce avec les capacités des procédés étudiés. Il y a trois aspects dans cette évaluation : l'évaluation primaire, qui concerne les entités géométriques de la cavité, l'évaluation des éléments secondaires du moule (les éjecteurs, par exemple), et une évaluation des coûts. Cet outil est donc basé sur une décomposition en entités de la pièce à analyser, et les paramètres des entités qui interviennent sont : la typologie, les dimensions maximales dans les différentes directions, la précision dimensionnelle, la rugosité, les tolérances de rectitude, de planéité et de circularité. Interviennent également les rapports d'élancement de certaines entités, avec l'intéressante suggestion de rapporter un insert si le rapport d'élancement est trop important pour une entité (notion d'outillage modulaire ?).

On peut également trouver dans les travaux de S.H. Masood un système expert à base de règles qui permet de sélectionner un procédé pour une application de fabrication rapide (*IRIS Intelligent Rapid Prototyping System Selector* [MAS02]). Ce système vise à faire un choix de machine à partir des facteurs suivants :

- Le coût ;
- La précision dimensionnelle, dans le plan X-Y et dans la direction Z ;
- L'état de surface ;
- Les dimensions maximales compatibles avec le volume enveloppe ;
- Le type de matériaux disponibles ;
- La gamme d'épaisseur des couches ;
- La vitesse de fabrication.

Il est étonnant de voir que dans ce système, la morphologie de la pièce n'intervient presque pas dans le choix d'une machine de fabrication rapide. En effet, la forme des pièces influence fortement la précision dimensionnelle (phénomène démontré dans des travaux précédemment cités, notamment de J.P. Kruth [KRU05] et d'E. Pessard [PES08]), et la vitesse de fabrication dépend également de la complexité géométrique (fabrication de supports, etc). Il convient donc de tenir compte d'autres caractéristiques morphologiques que les simples dimensions maximales. Notons que dans les travaux

d'E. Pessard, il a été montré que la précision dimensionnelle dépendait également de la distance par rapport au centre de la zone de fabrication [PES06].

D'autres expérimentations de fabrication de pièces par ajout de matière mettent en avant les facteurs correspondants à notre définition de la complexité de fabrication. Par exemple, un plan d'expériences pour déterminer les paramètres influençant le retrait lors de la fabrication par SLS (qui est une cause importante de manque de précision) met évidence que les rapports de forme suivant les différentes directions (X, Y et Z, la direction normale aux couches) sont les paramètres géométriques prépondérants [RAG07]. Il pourra donc être intéressant d'en tenir compte pour évaluer la complexité de fabrication par ajout de matière.

En ce qui concerne les matériaux, il est clair que le matériau sélectionné influence les paramètres de fabrication. En revanche, les contraintes ne sont pas les mêmes que pour l'usinage, car les paramètres de coupe sont principalement conditionnés par la dureté du matériau. En effet, les poudres métalliques ont un coût assez élevé, et si des matériaux spécifiques peuvent être utilisés, leur prix augmentent rapidement : de 120 € / kg pour une poudre métallique en acier inoxydable (StainlessSteel 17-4) à 485 € / kg pour une poudre titane (Titanium Ti64) chez le fabricant EOS [EOS07b].

De plus, la température du point de fusion du matériau est également à prendre en compte. Suivant les types de procédés et les poudres, il peut y avoir un matériau à plus bas point de fusion inclus dans la poudre métallique, et c'est ce second matériau qui va être fusionné par l'énergie du laser afin d'agglomérer les grains de poudres voisins. Ceci permet de diminuer la puissance du laser nécessaire à la fabrication.

Une fois encore, nous pouvons classer tous ces paramètres selon qu'ils fassent référence à la morphologie de la pièce, à des caractéristiques du matériau envisagé, ou à des spécifications.

3.4. Autre exemple de procédé

Y.M. Chen a travaillé sur l'évaluation de la fabricabilité pour des pièces destinées à être réalisées par moulage [CHE03]. Outre l'importance de disposer d'une double vision, locale pour des caractéristiques propres à chaque entité et globale pour des propriétés de la pièce complète, que nous avons déjà mise en avant, ses travaux relatent différentes caractéristiques qu'il est nécessaire d'identifier afin de calculer la fabricabilité. Il s'agit des zones massives (pour des raisons de refroidissement), des coins pointus, des rapports de forme (longueur / largeur / hauteur / profondeur) des entités, des zones en contre-dépouille, des épaisseurs locales et des changements d'épaisseurs, etc.

3.5. Synthèse sur les paramètres influençant la complexité de fabrication et lien vers le calcul des indices

À partir des analyses précédentes, nous construisons la Figure 50 qui reprend sous forme synthétique les différents paramètres qu'il faut évaluer pour connaître la complexité de fabrication d'une pièce. Avec cette synthèse, nous sommes désormais en mesure de définir en détail des indices de complexité de fabrication. Dans la partie suivante, nous allons exposer précisément quels sont les indices que nous avons mis en place, et comment ils sont calculés. Nous rappelons que les indices peuvent être de deux types, globaux ou locaux, et être associés à une fabrication par enlèvement de matière ou par ajout de matière.

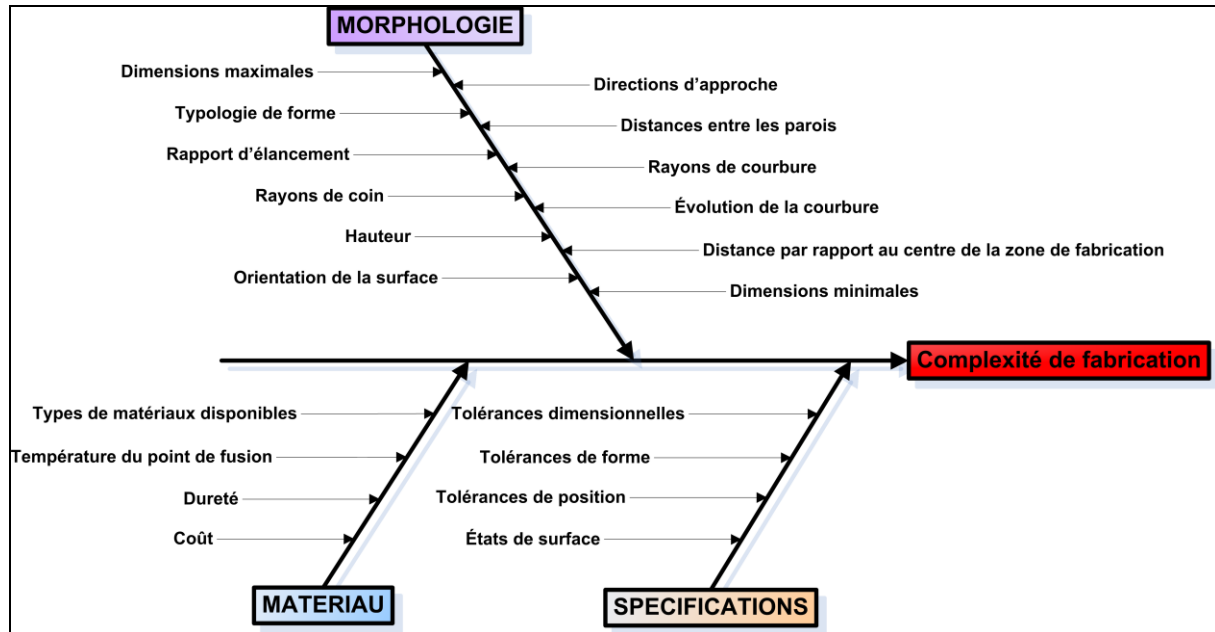


Figure 50. Paramètres à prendre en compte pour calculer la complexité de fabrication.

4. Définitions des indices de complexité de fabrication

4.1. Exemples d'indices provenant de l'analyse bibliographique

Avant de développer les indices que nous avons mis en place, correspondants à notre définition, nous allons terminer l'analyse bibliographique des travaux dans le domaine par la présentation des indices de fabricabilité utilisés dans les travaux de S.K. Ong et M. Korosec précédemment cités.

4.1.1. *Manufacturability Indexes (MIs) des travaux de S.K. Ong*

Ces indices de difficulté de fabrication sont multiples. Il y a d'une part ceux qui proviennent d'une vision globale de la fabricabilité. Il s'agit de MI_{Clamp} et MI_{SUP} correspondant respectivement à une évaluation du type d'entraînement et du coût relatif du type de montage (pour une application à des pièces réalisées par tournage : montage entre pointes, avec poupée, ou montage simple, dépendant du rapport L / D de la pièce). D'autre part, des indices sont associés à chaque entité de la pièce, ce qui s'apparente bien à une vision locale de la complexité de fabrication. MI_{OPi} , MI_{TOLi} et MI_{SFi} sont en effet définis pour chaque entité i . MI_{OPi} est calculé à partir du coût relatif de l'opération de tournage nécessaire pour réaliser l'entité i (contournage, alésage, taraudage, etc). MI_{TOLi} correspond à la tolérance dimensionnelle de l'entité i et MI_{SFi} à son état de surface. Ces deux indices sont calculés de façon similaire, c'est pourquoi nous allons détailler le processus de calcul de MI_{TOLi} .

Premièrement, le coût relatif de la tolérance, M_{TOLi} , est déterminé à partir de la valeur de la tolérance dimensionnelle de l'entité V_{TOLi} grâce à la courbe de la Figure 51, reprise par la relation suivante :

$$M_{TOLi} = y_0 + A_1 \exp\left(-\frac{V_{TOLi} - x_0}{t_1}\right)$$

$$y_0 = 1,85759 ; x_0 = 0.025 ; A_1 = 17.69164 \text{ et } t_1 = 0.10522.$$

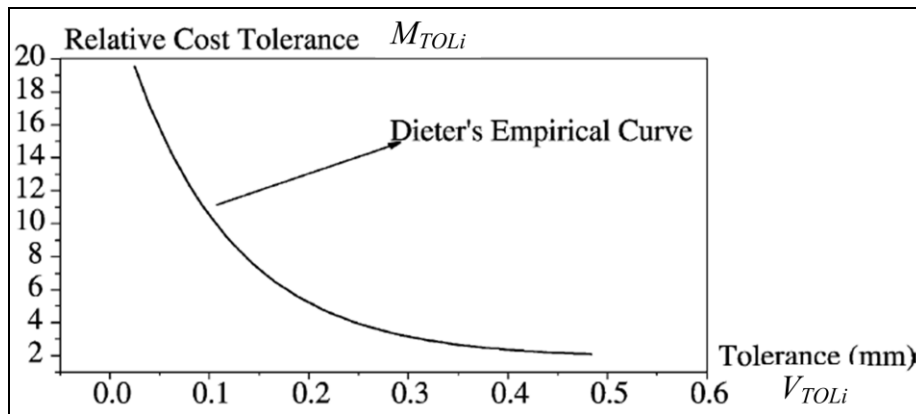


Figure 51. Coût relatif lié à la tolérance [ONG03].

À partir de ces valeurs des M_{TOLi} , et de leur minimum $(M_{TOL})_{MIN}$, la valeur de l'indice de fabricabilité de l'entité i est calculé avec la relation suivante :

$$MI_{TOLi} = \frac{(M_{TOL})_{MIN}}{M_{TOLi}} \times 0,9$$

Ainsi la valeur maximale de 0,9 correspond à l'entité la plus facilement fabriquable, du point de vue de la tolérance dimensionnelle.

Pour conclure, la fabricabilité d'une pièce est calculée grâce à la relation suivante :

$$MI = MI_{Clamp} + MI_{SUP} + \sum_{i=1}^n W_{Fi} (MI_{OPi} + MI_{TOLi} + MI_{SFi})$$

W_{Fi} est le poids attaché à l'entité i , déterminé par la méthode AHP de comparaison par paires.

Ce que nous retenons de cette étude, outre les paramètres qui influencent la complexité de fabrication, c'est que les valeurs des indices sont normées (entre 0 et 0,9) ce qui permet une comparaison aisée. De plus, il y a des valeurs globales et locales. Afin d'avoir une vision complète de la fabricabilité, les valeurs des indices locaux sont regroupées et pondérées dans le but d'être associées aux valeurs globales. Ce qui est intéressant également, c'est l'aspect relatif des valeurs locales. C'est-à-dire qu'une entité n'est pas réellement dite complexe en soi, mais qu'avec cette méthode, certaines entités vont être considérées comme étant plus complexes que d'autres. Ce qui permet de classer les entités, afin de consacrer les efforts de conception sur certaines entités seulement afin de diminuer la complexité globale. C'est là aussi un aspect primordial : cette évaluation de la fabricabilité s'effectue en phase de conception, puisque les valeurs des indices sont déterminées directement avec des paramètres de conception, sans avoir à réaliser la phase de préparation de la fabrication, qui est longue, délicate et presque systématiquement subjective.

En revanche, là où nous pressentons que des améliorations peuvent être apportées à ces indices est principalement sur la décomposition en entités dont nous avons précédemment expliqué qu'elle n'est pas adaptée pour notre application d'outillages modulaires hybrides. De plus, le fait qu'une valeur élevée d'indice de fabricabilité correspond à de faibles difficultés de fabrication n'est sans doute pas le plus explicite.

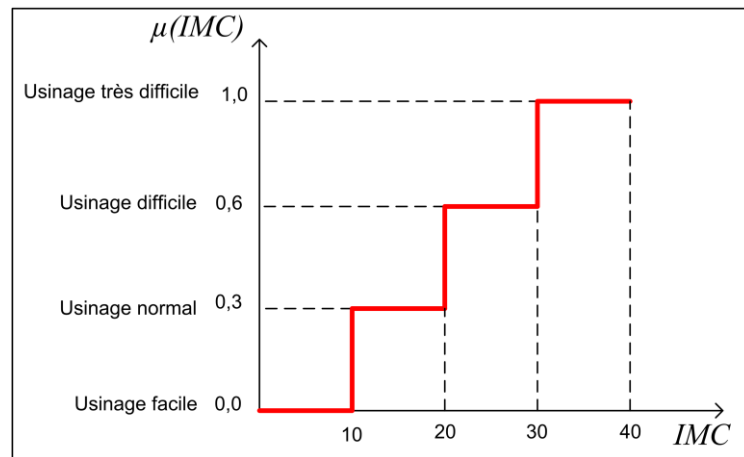
4.1.2. Index of Machining Complexity (IMC) des travaux de M. Korosec

Ces travaux se concentrent sur la fabrication par usinage de surfaces de formes complexes. L'indice qui est défini se concentre principalement sur la courbure de la surface et se calcule avec la relation suivante [KOR05] :

$$IMC = \left(a \cdot \sum Gauss_curvature + b \cdot \sum surface_gradients \right) \cdot \frac{\max R}{\min R} \cdot \left(\frac{S}{V} \right)^{\frac{a_{\max}}{a_{\min}}}$$

a est un coefficient qui tient compte de la dureté du matériau, la valeur de b dépend du type d'opérations (finition, ébauche). Cet indice IMC prend en considération deux aspects intéressants, à savoir les rayons de courbure ($Gauss_curvature$ et R) et leurs évolutions ($surface_gradients$) puisque la vitesse d'avance sera fortement altérée dans le cas où le gradient des courbures des surfaces est important (par conséquent, la surface sera considérée comme plus complexe à usiner car il sera alors délicat d'assurer une vitesse d'avance élevée à cause des nombreuses accélérations et décélérations des axes de la machine). De plus, le rapport S / V permet d'handicaper les surfaces « tortueuses ». Le rapport entre les profondeurs de passe maximale et minimale est également, selon ces travaux, une image de la topologie de la surface.

La valeur de l'indice IMC est ensuite normée, c'est-à-dire ramenée à une valeur entre 0 et 1 comme le montre la Figure 52.

Figure 52. Valeur normée pour l'indice *IMC* [KOR05].

Cet indice est très intéressant d'un point de vue de sa construction et des paramètres qu'il prend en compte. Là encore, sa valeur finale est comprise entre 0 et 1 pour faciliter les comparaisons. Contrairement aux indices du paragraphe précédent, une valeur élevée correspond à une surface délicate à usiner. Nous notons cependant un point négatif : d'une estimation quantitative de la complexité de fabrication, une simple vision qualitative est retenue (usinage facile, normal, difficile ou très difficile). Il semble pourtant capital que pour disposer d'une vision précise permettant de comparer différentes conceptions de pièces, il faut affiner l'estimation de la fabricabilité et ne pas rester à une considération purement qualitative.

4.2. Nos indices de complexité de fabrication

4.2.1. Notations

Pour chaque indice, il est nécessaire de proposer une notation claire et explicite. Dans la littérature, nous trouvons différentes variantes d'écritures d'indices de complexité. Comme on l'a vu, S.K. Ong utilise les variables MIF_i pour *Manufacturability Index of Feature i* [ONG03]. Si cette notation est claire en langue anglaise, il n'en est pas de même en français. Or il nous semble judicieux de choisir un nom de variable identique dans les deux langues, et qui soit tout aussi explicite en français qu'en anglais. C'est pourquoi, nous choisissons la lettre *C*, indifféremment pour « complexité » ou « complexity ».

Cependant, nous avons vu que les indices ne vont pas être les mêmes dans le cas d'une fabrication par usinage ou par ajout de matière. Dans ce cas, nous ajoutons à la lettre un signe « - » s'il s'agit d'un indice lié à une fabrication par enlèvement de matière, et « + » s'il s'agit d'un indice lié à une fabrication par ajout de matière.

De plus, l'étude menée dans la partie précédente nous a conduits à définir de nombreux paramètres influençant la complexité de fabrication. Il y aura donc plusieurs indices qu'il faut désormais différencier. Pour cela, nous choisissons d'associer à la lettre *C* au moins une autre lettre, représentative du ou des paramètres intervenant dans la création de l'indice. Par exemple, pour l'indice de difficulté de fabrication par ajout de matière lié au volume, la notation retenue est $C(v)^+$.

Et enfin, dans le cas des indices locaux, les indices sont calculés pour différents octants. On ajoutera alors le numéro de l'octant pour lequel l'indice est calculé. Par exemple, l'indice local lié à la flexibilité de l'outil de coupe pour l'usinage et correspondant à l'octant 254 sera noté $C_{254}(f)^-$.

4.2.2. Principe de calcul des indices

Pour chaque indice, la procédure de calcul est sensiblement identique. La première étape concerne la récupération des valeurs des paramètres de conception nécessaires. Ces valeurs proviennent directement du modèle CAO de la pièce et des informations de conception. La seconde étape correspond à une mise en relation entre ces valeurs et des données liées à la fabrication de l'outillage. Il est primordial que cette étape se déroule de façon automatique, puisque nous souhaitons que la méthode soit utilisable en phase de conception, donc l'utilisateur-concepteur doit pouvoir avoir accès à ces données le plus simplement possible et sans avoir à mettre en œuvre des connaissances particulières en fabrication. Enfin, la troisième et dernière étape est constituée par le calcul proprement dit de l'indice. Cette procédure est résumée sur la Figure 53 et illustrée par le calcul simplifié d'un indice de complexité de fabrication par enlèvement de matière lié aux dimensions maximales de l'outillage dans une direction ($C(d_y)^-$). Cet indice ne sert ici que d'illustration, car il n'est pas utilisé directement, mais intégré dans un calcul d'indice plus complet, $C(d)^-$, lié aux dimensions maximales de l'outillage et développé dans les paragraphes suivants.

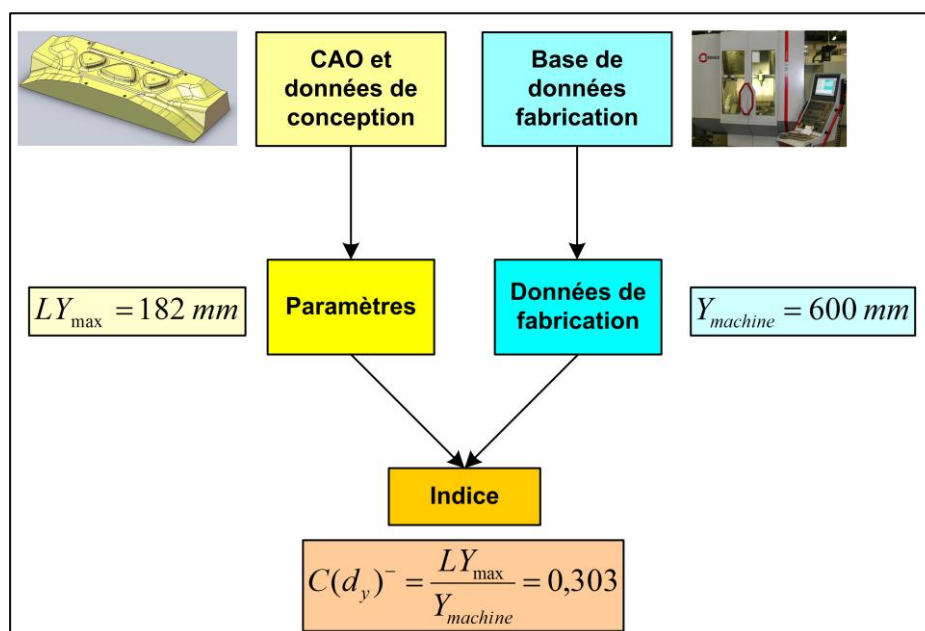


Figure 53. Procédure générale de calcul des indices.

4.2.3. Indice pour l'usinage lié aux dimensions maximales

Commençons par définir un indice de complexité de fabrication par usinage en liaison avec la correspondance entre les dimensions maximales de l'outillage à fabriquer et la machine-outil supposée. Le constat simple qui est à la base du calcul de cet indice est le suivant :

Pour assurer la compatibilité entre les dimensions maximales de l'outillage et les courses des axes de la machine de fabrication (qui doivent être supérieures, ou à la limite égales aux dimensions maximales), il est parfois nécessaire d'utiliser une machine plus grande, avec un coût d'utilisation plus élevé.

Le calcul de l'indice nécessite de connaître au préalable l'orientation de l'outillage dans l'espace de travail. Nous avons supposé que ces informations étaient renseignées par le concepteur, en orientant le repère de création du modèle CAO de l'outillage de telle sorte que l'axe Z corresponde à l'axe de la

broche de la machine-outil, puis que l'axe X corresponde à la plus grande dimension dans le plan perpendiculaire à Z, l'axe Y complète alors le repère orthonormé (O, X, Y, Z) . La Figure 54 présente cette configuration.

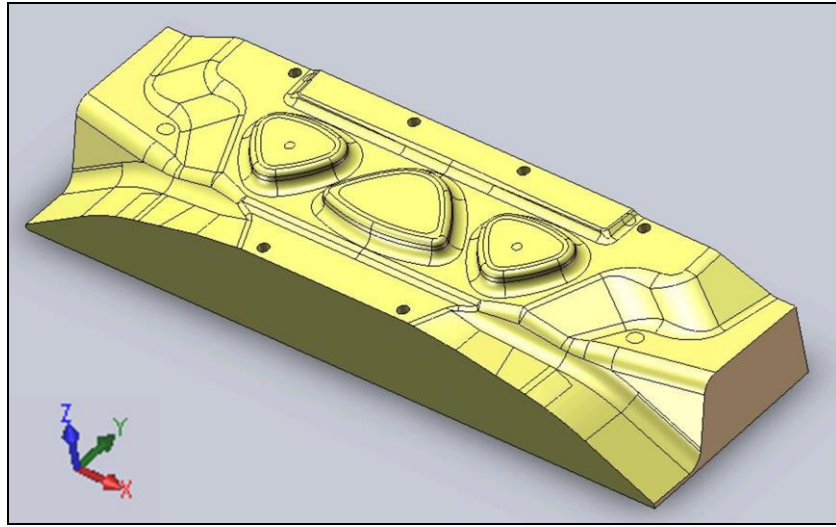


Figure 54. Orientation des axes.

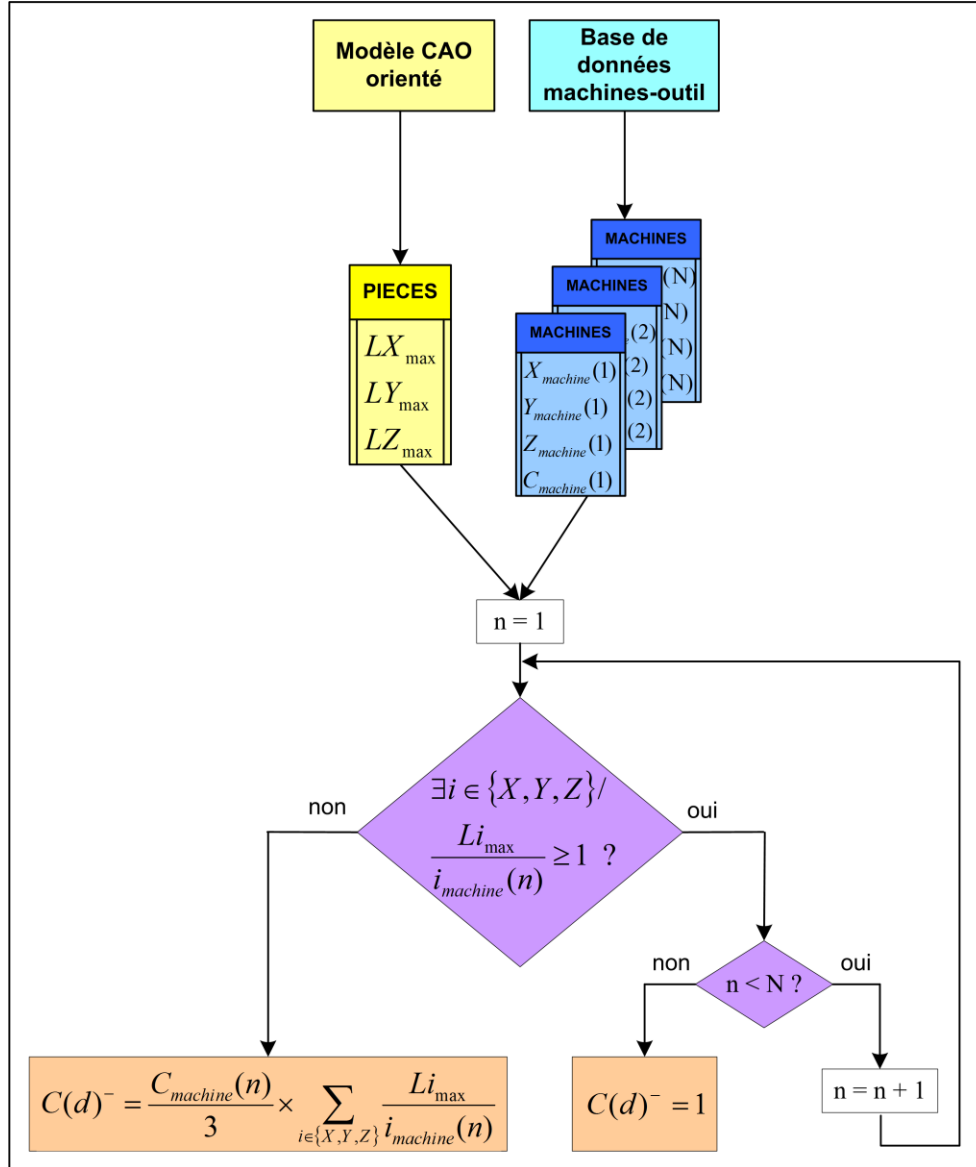
Ensuite, il est également nécessaire que la base de données fabrication soit complétée avec des machines-outils. Nous verrons dans le chapitre 4 comment sont renseignées les informations de cette base, mais pour l'instant, retenons qu'elle contient des fiches machines, et que dans ces fiches sont disponibles les longueurs des axes (notés $X_{machine}$, $Y_{machine}$ et $Z_{machine}$) et un indice de coût relatif de la machine ($C_{machine}$). Cet indice de coût a une valeur adimensionnelle, entre 0 et 1 et n'est utilisé qu'à des fins de comparaison entre les différentes machines. À ce stade de la description de l'utilisation de la méthode de conception d'outillages modulaires hybrides, nous considérons qu'une machine ayant un volume d'espace de travail plus grand qu'une autre aura un indice de coût relatif plus élevé. Dans cette définition, nous ne nous limitons pas aux machines-outils à structure sérielle, car la définition est similaire avec une machine à structure parallèle. Dans ce cas, ce n'est plus la longueur des axes qui importe, mais les déplacements possibles de la broche suivant les trois directions X, Y et Z, qui seront alors également notés $X_{machine}$, $Y_{machine}$ et $Z_{machine}$ respectivement. Nous restreignons cependant le choix à des applications d'usinage en 3 axes.

Le calcul de l'indice s'opère donc à partir du modèle CAO correctement orientée de l'outillage, et des fiches machines de la base de données, comme cela est illustré dans la Figure 55. Il est nécessaire pour le bon déroulement du calcul que les fiches machines, numérotées de 1 à N , soit classées de telle sorte que la machine 1 ait le plus faible indice de coût, et la machine N le plus important, respectant ainsi la relation suivante :

$$\forall k \in \{1, \dots, N-1\} \quad C_{machine}(k) < C_{machine}(k+1)$$

La définition de cet indice est assez explicite pour comprendre qu'une valeur égale à 1 correspond à une incompatibilité entre l'outillage conçu et la machine de fabrication. En pratique, cela correspond à un outillage plus grand dans une direction que les déplacements possibles de l'axe de la machine dans cette direction. Plus la valeur est élevée et se rapproche de 1 et plus l'outillage sera considéré comme complexe à fabriquer. Cette définition n'est peut-être pas intuitive, mais elle correspond bien à la complexité de fabrication telle que nous la définissons. Les dimensions maximales d'une pièce

influencent le temps et le coût de fabrication, au travers notamment de la mise et du maintien en position de la pièce sur la table de la machine, du coût matière première, etc. En outre, des dimensions importantes vont même parfois nécessiter l'utilisation d'une machine de grandes dimensions (avec un indice de coût important).

Figure 55. Calcul de l'indice $C(d)^-$.

4.2.4. Indice pour l'ajout de matière lié aux dimensions maximales

Un indice global de complexité de fabrication par ajout de matière est défini de façon complètement similaire. Il est noté $C(d)^+$, et est calculé à partir du modèle CAO orienté avec la convention suivante : l'axe Z de l'outillage correspond à la direction normale aux couches, puis l'axe X correspond à la plus grande direction dans le plan perpendiculaire à Z, l'axe Y venant compléter le repère orthonormé (O, X, Y, Z) .

En ce qui concerne les machines, la base de données fabrication contient également des informations sur les machines de fabrication avec des technologies additives. Il s'agit des dimensions

maximales du volume de travail dans les trois directions X, Y et Z (notées respectivement $X_{machine}$, $Y_{machine}$ et $Z_{machine}$) ainsi qu'un indice de coût analogue à celui des machines-outils d'usinage.

Les procédures de calculs sont alors identiques à celles de l'indice $C(d)$ (Figure 55).

4.2.5. Indice pour l'usinage lié aux dimensions minimales

Toujours en restant sur des paramètres dimensionnels, les dimensions minimales jouent également un rôle dans l'évaluation de la complexité de fabrication. C'est pourquoi, pour ce qui concerne l'usinage, nous faisons le constat suivant :

Les usinages de pièces dont les détails impliquent l'utilisation d'outils de coupe de trop faibles dimensions par rapport aux gammes d'outils dites standard vont être très coûteux.

En effet, dès qu'on s'écarte des gammes d'outils de coupe standard, cela nécessite l'utilisation d'outils de coupe spécifique (fraise de diamètre très faible par exemple), et le coût total de fabrication de l'outillage s'en ressent. Par conséquent, nous considérons qu'il faut tenir compte de l'adéquation entre les dimensions minimales et une gamme d'outils de coupe standard pour estimer la complexité de fabrication. Cette limite est prise en compte via l'indice local de flexibilité de l'outil de coupe, qui sera détaillé par la suite.

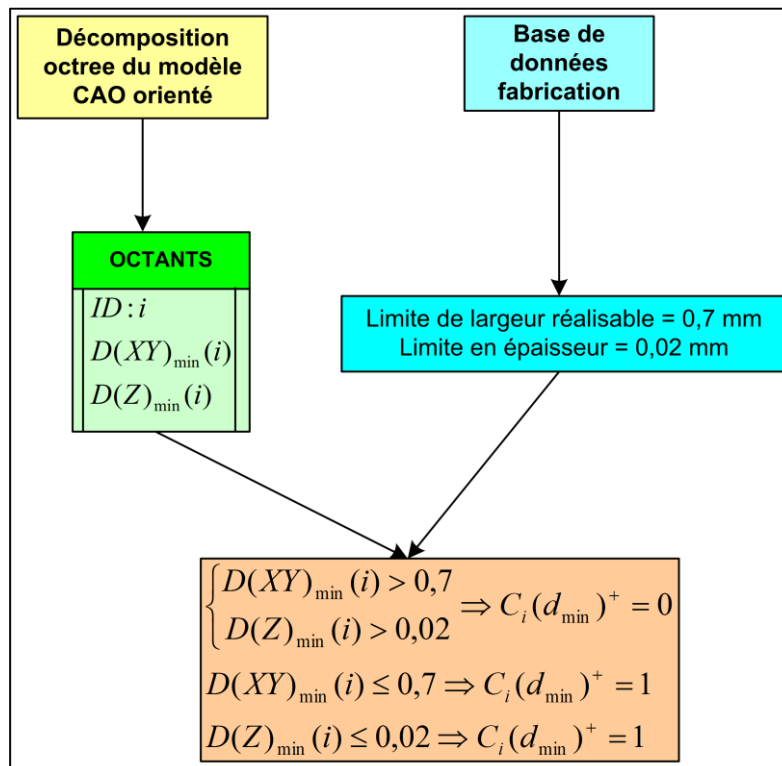
4.2.6. Indice pour l'ajout de matière lié aux dimensions minimales

Pour ce qui concerne la fabrication par ajout de matière, les limites proviennent d'une part du diamètre de la source laser et de la taille des grains de poudre d'autre part.

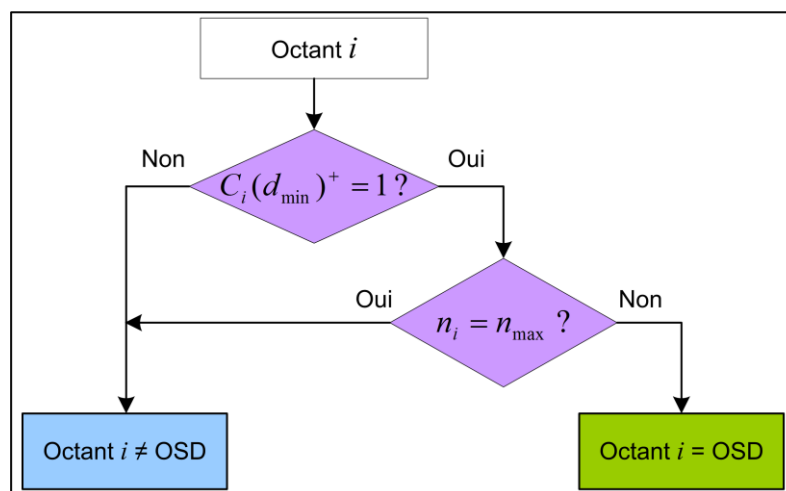
En effet, dans la direction normale aux couches, la taille du grain de matière est la limite dimensionnelle des détails car elle va limiter l'épaisseur des couches. Pour des machines courantes, nous disposons classiquement de poudres métalliques de 20 μm à 50 μm . Dans notre application aux outillages, nous n'avons pas rencontré des zones pour lesquelles cette limite de 0,02 mm était atteinte, cependant, nous en tenons tout de même compte pour le calcul de l'indice.

Au sein de chaque couche, les limites proviennent du diamètre focal du faisceau laser (qui est, à titre d'exemple, de 0,45 mm pour une source standard sur une machine EOS). La largeur limite de réalisation est un peu plus élevée que le diamètre focal à cause d'effets de conductivité thermique. Ainsi la société EOS précise que pour des largeurs inférieures à 0,7 mm, les géométries ne seront pas correctement réalisées [EOS02]. Cela s'observe expérimentalement, par exemple dans des travaux de comparaison des performances de différents procédés de fabrication par ajout de matière dont les résultats ont été présentés dans le Tableau 2. Ces travaux mettent en évidence la possibilité de réaliser des parties avec des dimensions inférieures à 0,7 mm (cylindre de 0,5 mm de diamètre, voile mince de 0,5 mm et 0,25 mm), mais avec une précision calamiteuse (les dimensions obtenues sont 25 %, 36 % et jusqu'à 88 % supérieures aux dimensions visées).

Ainsi, pour cet indice (noté $C_i(d_{\min})^+$), nous avons besoin de connaître les dimensions minimales suivant le plan X-Y et suivant la direction Z définie avec l'orientation précédente. Nous nous basons donc sur un modèle CAO orienté. Comme ces dimensions minimales peuvent avoir des valeurs très différentes selon la zone considérée de l'outillage, il s'agira d'un indice local, qui est donc calculé pour chaque octant gris. Nous notons $D(XY)_{\min}(i)$ (respectivement $D(Z)_{\min}(i)$) la dimension minimale suivant le plan XY (respectivement la direction Z) du volume de la pièce contenue dans l'octant i . La Figure 56 précise le calcul de l'indice (qui prend soit la valeur 0, soit la valeur 1).

Figure 56. Calcul de l'indice $C_i(d_{\min})^+$.

Comme il s'agit d'un indice local, il va être intéressant de poursuivre la décomposition octree uniquement dans les zones pour lesquelles la valeur de l'indice $C_i(d_{\min})^+$ vaut 1. Ce qui est un réel avantage, puisque si aucune zone de l'outillage ne contient des détails de dimensions très faibles et incompatibles avec une fabrication par technique additive, la décomposition octree s'arrête au niveau 1, ce qui est très rapide. Dans le cas contraire, elle se poursuivra uniquement pour les octants gris dont la valeur de l'indice vaut 1 jusqu'à la dimension minimale des octants indiquée (n_{\max}). Nous utilisons alors le concept d'OSD (Octants qui doivent être Sous-Décomposés). Dans le cas de l'indice $C_i(d_{\min})^+$, les OSD sont les octants gris pour lesquels la valeur de l'indice vaut 1 et qui ne sont pas encore au niveau maximum de décomposition, comme cela est illustré par l'algorithme de description des OSD présenté sur la Figure 57.

Figure 57. OSD dans le cas de l'indice $C_i(d_{\min})^+$.

4.2.7. Indice pour l'usinage lié à la flexibilité de l'outil de coupe

Cet indice est basé sur les paramètres morphologiques de l'outillage qui vont imposer des contraintes dimensionnelles sur l'outil de coupe. Plusieurs constats généraux sont à la base de la définition de cet indice :

Lorsque le rapport $\frac{\text{longueur}}{\text{diamètre}}$ de l'outil de coupe augmente, des phénomènes de vibrations et de flexion d'outil apparaissent, rendant alors plus difficile la génération de surfaces avec un haut niveau de qualité. De plus, pour une même surface, lorsque le diamètre de l'outil de coupe diminue, la durée d'usinage augmente car les déplacements sont plus nombreux. En outre, des détails géométriques avec des dimensions trop petites impliqueront l'utilisation d'outils de coupe de dimensions non standard chez les fabricants d'outils, ce qui augmente bien évidemment le coût de fabrication.

À partir de ces constats, qui sont valables de façon générale sans tenir compte de quelques particularités qui pourraient les contredire, nous cherchons donc à déterminer les paramètres de l'outillage qui définissent les limites de diamètre et de longueur de l'outil de coupe nécessaire à l'usinage. La Figure 58 présente l'ensemble de ces paramètres pour l'exemple de l'usinage d'une poche [KER08a].

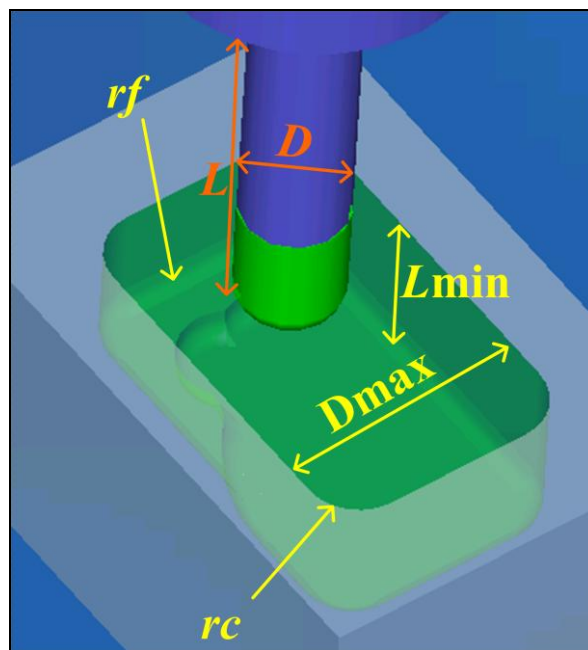


Figure 58. Définition des paramètres morphologiques qui limitent les dimensions de l'outil de coupe.

Ainsi les dimensions L et D de l'outil de coupe dépendent de quatre paramètres :

- rf , qui est le rayon de fond (*floor radius*), et qui impose d'avoir un outil avec un rayon de bout inférieur ou à la limite égal à rf . Dans ce cas, l'outil de coupe doit être torique ou hémisphérique et avec une dimension de rayon en bout d'outil compatible avec la valeur de rf . De plus, lorsque la valeur de rf devient nulle, c'est-à-dire qu'il y a une arête vive entre la paroi et le fond de la poche, une fraise 2 tailles est obligatoire ;
- rc , qui est le rayon de coin (*corner radius*), et qui impose d'avoir un outil avec un diamètre inférieur ou à la limite égal à deux fois la valeur de rc ;

- L_{min} , qui est la longueur minimale que doit avoir l'outil de coupe, et qui correspond donc à la profondeur maximale de la zone à usiner.
- D_{max} , qui est le diamètre maximal que peut prendre l'outil de coupe, et qui correspond donc à la distance minimale entre les parois dans la zone à usiner ;

Ces quatre paramètres sont déterminés pour chaque octant gris issu de la décomposition octree. Les valeurs des rayons de fond et de coin sont déterminées en observant les rayons minimums de courbure pour les surfaces concaves contenues dans l'intersection entre l'outillage et les octants gris. En ce qui concerne les valeurs de L_{min} et D_{max} , les calculs sont facilités par la structuration des données issues de la décomposition en octree. Avec cette structuration, le numéro de l'octant suffit à connaître sa position et ses dimensions, en relation avec la position dans l'espace et les dimensions de l'octant 0. En effet, comme cela était montré précédemment sur la Figure 42, les numéros des octants suivent un ordre logique. Ainsi, pour chaque octant, nous pouvons connaître ses voisins dans les trois directions et les distances les séparant. Le calcul de L_{min} correspond à la différence de hauteur (dans la direction Z) entre la face supérieure de l'octant gris ou noir de plus haute altitude (repéré octant h) et la face inférieure de l'octant i pour lequel on calcule $L_{min}(i)$:

$$L_{min}(i) = \left(z(h) + \frac{LZ_{max}}{2^{n(h)}} \right) - \left(z(i) + \frac{LZ_{max}}{2^{n(i)}} \right)$$

$z(h)$ représente l'altitude du centre de gravité de l'octant h et $n(h)$ représente le niveau de décomposition auquel a été créé l'octant h (idem pour l'octant i). LZ_{max} est la dimension de l'octant 0 dans la direction Z (ce qui correspond à la dimension maximale de l'outillage dans la direction Z).

Pour le calcul de D_{max} , nous mettons en place les définitions suivantes :

Octants voisins directs : Deux octants (gris ou noirs) sont dits voisins directs si et seulement si ils ont une partie d'une face en commun.

Directions d'ouvertures d'un octant : Une direction (X^+ , X^- , Y^+ , Y^- , Z^+ , Z^-) est dite direction d'ouverture pour un octant si et seulement si cet octant ne possède pas de voisin direct dans cette direction.

Octants voisins indirects : Deux octants (gris ou noir) sont dits voisins indirects si et seulement si, à partir de l'un, on trouve l'autre en suivant une de ses directions d'ouverture.

Le calcul de D_{max} s'effectue en suivant les règles suivantes :

Si un octant i possède des octants voisins indirects dans toutes ses directions d'ouvertures (cas n°1) ou qu'il existe des voisins indirects dans les directions perpendiculaires à toutes ses directions d'ouvertures (cas n°2), alors $D_{max}(i)$ a une limite finie. Il s'agit du minimum de distance entre l'octant i et ses voisins indirects ou entre les octants voisins indirects dans les directions perpendiculaires à ses directions d'ouvertures.

Si un octant i possède une direction d'ouverture sans voisins indirects dans cette direction ni dans les directions perpendiculaires, alors $D_{max}(i)$ n'est pas limité c'est-à-dire qu'il n'y a pas de valeur pour $D_{max}(i)$ (cas n°3). Sauf dans le cas où tous les octants voisins directs de l'octant i ont une valeur D_{max} , dans ce cas, $D_{max}(i)$ est le minimum des D_{max} de ses voisins directs (cas n°4).

Pour expliquer ces définitions et ces règles, prenons l'exemple de la Figure 59 et intéressons-nous au calcul de D_{\max} pour les octants 18, 23 et 28. À titre d'illustration, les mesures de $L_{\min}(18)$, $L_{\min}(23)$ et $L_{\min}(28)$ sont également représentées sur cette figure. Le Tableau 5 présente les voisins directs, les directions d'ouvertures et les voisins indirects pour les octants 18, 23 et 28. Les directions d'ouvertures sont utiles pour calculer D_{\max} . En effet, ces directions correspondent aux opposés des directions d'arrivées d'outil de coupe possibles pour usiner la surface contenue dans l'octant. Il est cependant nécessaire d'en supprimer une, qui correspond au posage de la pièce sur le porte-pièce. Dans notre cas, il s'agit de Z^- .

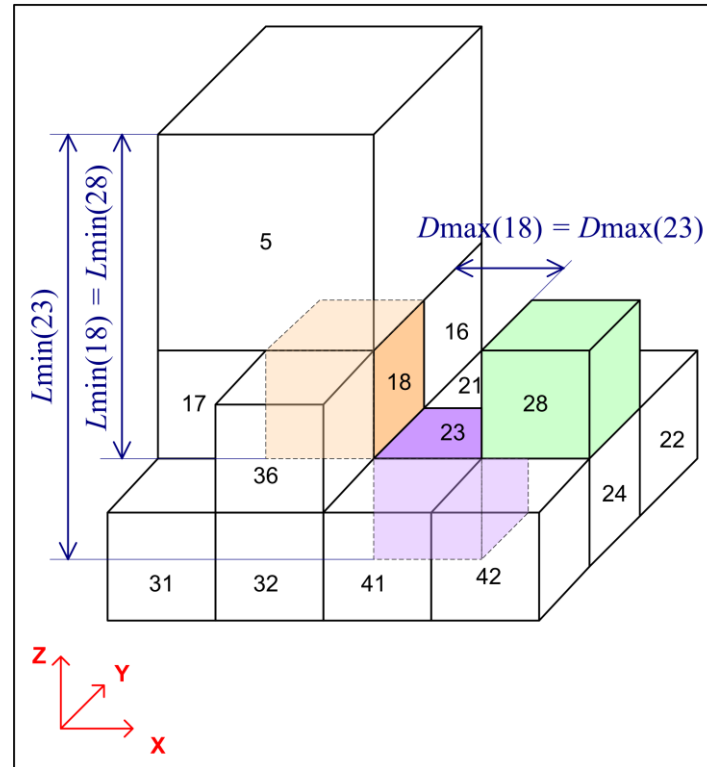


Figure 59. Illustration du calcul de D_{\max} par octants voisins directs et indirects et directions d'ouvertures.

Octants	Voisins directs	Directions d'ouvertures	Voisins indirects
18	17,16,36,14,5	X^+	28
23	24,14,21,41	Z^+, Z^-	-
28	24	X^+, X^-, Y^+, Y^-, Z^+	18

Tableau 5. Voisins directs, directions d'ouvertures et voisins indirects pour les octants 18, 23 et 28.

Les trois octants 18, 23 et 28 résument différentes configurations possibles pour le calcul de D_{\max} :

- L'octant 18 correspond au cas n°1, il a une seule direction d'ouverture et un voisin indirect dans cette direction, l'octant 28, donc $D_{\max}(18)$ est la distance entre les octants 18 et 28 ;
- L'octant 23 correspond au cas n°2, il a deux directions d'ouvertures, mais on ne conserve que Z^+ car Z^- est la direction de posage. En suivant cette direction à partir de l'octant 23, on trouve deux octants voisins indirects dans les directions perpendiculaires (X^+, X^-), les octants 18 et 28. Donc $D_{\max}(23)$ est la distance entre les octants 18 et 28 ;

- L'octant 28 correspond au cas n°3, il a au moins une direction d'ouverture sans voisins indirects (X^+ , Y^+ , Y^- , Z^+), et pas de voisins indirects dans les directions perpendiculaires d'au moins une de ses directions d'ouvertures (exemple, dans la direction Z^+ , l'octant 5 est bien dans une direction perpendiculaire à cette direction d'ouverture, mais n'a pas de voisin indirect). Dans ce cas, on considère que l'accès aux surfaces contenues dans l'octant 28 n'impose pas un outil de coupe de diamètre limité, donc il n'y a pas de diamètre maximal de l'outil de coupe à renseigner, donc pas de valeur pour $D_{\max}(28)$.
- Le cas n°4 n'est pas représenté ici, il correspondrait à une configuration dans laquelle un octant est entouré d'octants pour lesquels D_{\max} possède une valeur finie.

Tous ces paramètres sont renseignés dans un tableau afin de disposer aisément des valeurs et de préparer la détermination de L et D .

La Figure 60 présente donc les exemples d'extraction des paramètres morphologiques à partir de la décomposition octree de la pièce-test pour deux octants, et le Tableau 6 est un extrait du tableau renseigné pour ces octants.

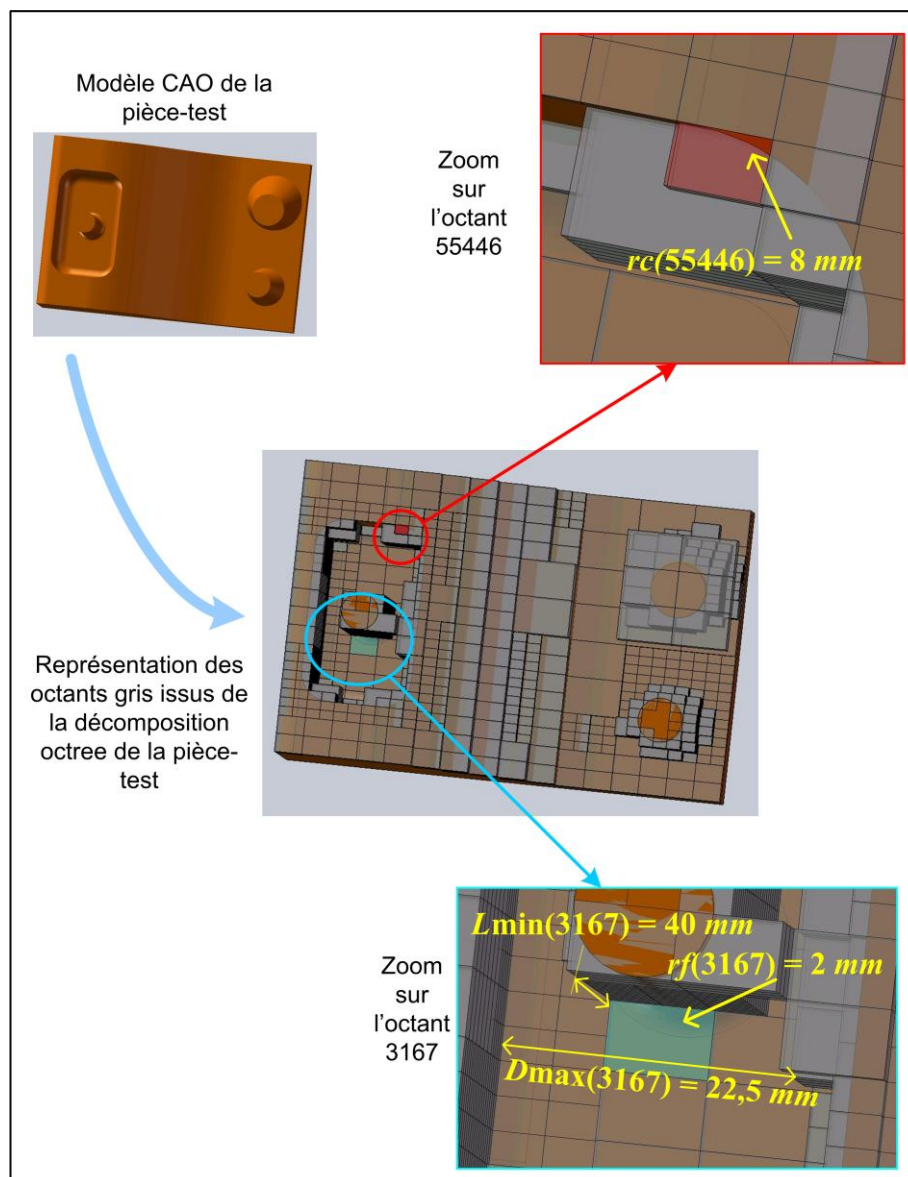


Figure 60. Extraction des paramètres morphologiques limitant les dimensions de l'outil de coupe.

N°	Couleur	rc	rf	$L \min$	$D \max$...
11882	Gris	8				...
7523	Gris		2	40	22,5	...
...

Tableau 6. Extraction des paramètres morphologiques limitant les dimensions de l'outil de coupe.

Un algorithme permet ensuite de connaître automatiquement les valeurs de L et D correspondant à un outil de coupe compatible avec ces valeurs, donc de choisir, dans une base de données, l'outil de coupe le plus apte à générer la surface contenue dans l'octant.

La base de données fabrication a été préalablement renseignée avec des fiches outils comprenant le type d'outils (fraise deux tailles, torique ou hémisphérique), la longueur minimale de sortie de la fraise par rapport à la broche (notée L_{seuil}), le diamètre (D), le rayon en bout d'outil (rb) pour les fraises toriques, et un indice de coût relatif d'outil (C_{outil}). Comme pour les fiches machines, nous verrons dans le chapitre suivant comment sont renseignées les données de ces fiches outils. L'indice de coût relatif sert à privilégier l'emploi d'outils de coupe standard, donc moins onéreux. À diamètre égal, une fraise deux tailles aura un indice de coût plus faible que celui d'une fraise torique, qui sera lui-même plus faible que celui d'une fraise hémisphérique. On conservera comme estimation de la longueur d'outil nécessaire à l'usinage des surfaces contenues dans l'octant i soit $L_{min}(i)$, soit $L_{seuil}(i)$ correspondant à l'outil de coupe déterminé par l'algorithme à partir des paramètres morphologiques et de la base de données. En effet, la flexibilité de l'outil dépend de son diamètre et de la distance entre la zone de contact outil / pièce et la zone de contact outil / porte-outil. Cette distance sera au minimum égale à $L_{seuil}(i)$, elle sera égale à $L_{min}(i)$ si $L_{min}(i)$ est supérieure :

$$L_{seuil}(i) \geq L_{min}(i) \Rightarrow L(i) = L_{seuil}(i)$$

$$L_{seuil}(i) < L_{min}(i) \Rightarrow L(i) = L_{min}(i)$$

Avec les valeurs L et D calculées pour chaque octant gris, nous associons à chaque octant gris un indice de complexité de fabrication dont la valeur est adimensionnelle et comprise entre 0 et 1, à partir du graphique de la Figure 61. La valeur de 10 pour le rapport L/D est la valeur limite de flexibilité pour un outil de coupe couramment admise dans la littérature [KEC03]. Si l'octant ne présente aucune limite sur D , nous considérons que tout outil de coupe peut convenir pour réaliser l'usinage des surfaces de l'outillage contenues dans l'octant, dans ce cas, nous associons la valeur ∞ à D , et 0 au rapport L/D .

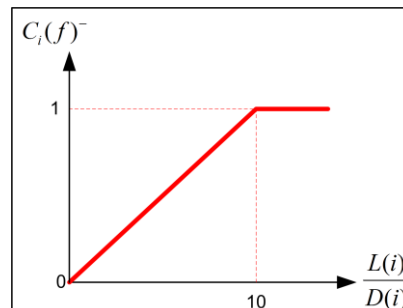
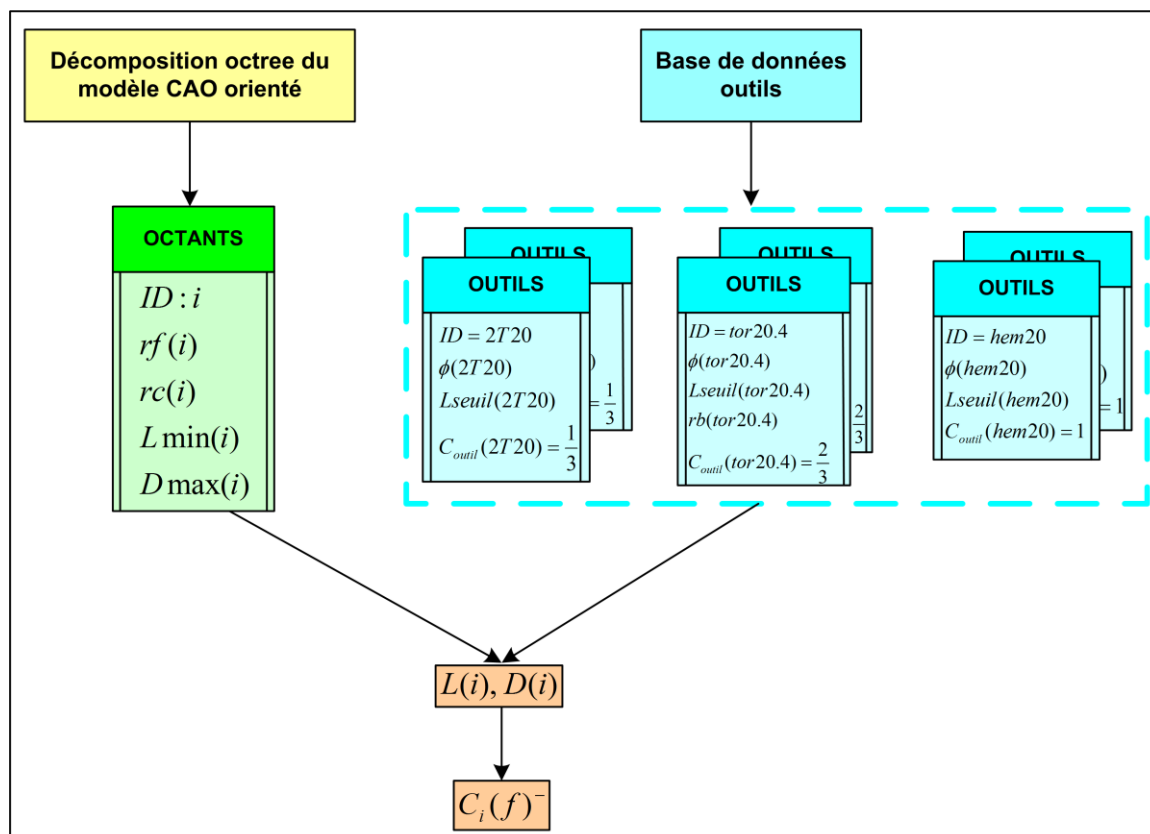
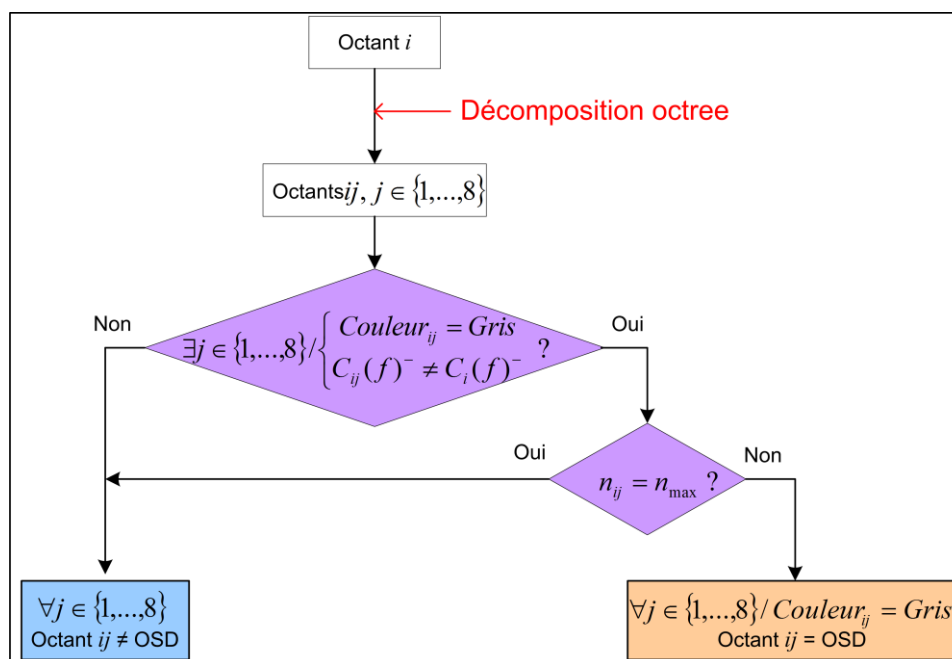


Figure 61. Graphique donnant l'évolution de la valeur de $C_i(f)^-$ en fonction de la valeur de $\frac{L(i)}{D(i)}$.

Nous résumons le calcul complet de cet indice local de complexité de fabrication pour l'usinage par la Figure 62.


 Figure 62. Calcul de l'indice $C_i(f)^-$.

Comme c'est un indice local, il convient de définir quels seront les OSD. Nous ne décomposerons au niveau supérieur uniquement les octants gris pour lesquels un nouveau niveau de décomposition va pouvoir apporter une précision supplémentaire sur la complexité de fabrication. C'est pourquoi il ne sera pas nécessaire de décomposer les octants gris s'ils ont tous la même valeur que l'octant dont ils sont issus. Cela peut se traduire par l'algorithme suivant (Figure 63).


 Figure 63. OSD dans le cas de l'indice $C_i(f)^-$.

4.2.8. Indice pour l'usinage lié à la quantité de copeaux

À partir des paramètres morphologiques qui influencent la complexité de fabrication, un autre indice est défini pour l'usinage. Il concerne le volume du brut et la quantité de copeaux.

La quantité de matière qui part en copeaux lors de l'usinage est à minimiser pour minimiser le coût de matière.

Cet indice (noté $C(c)^-$) est donc en relation directe avec la quantité de copeaux. Pour le calculer, il faut connaître le volume de la pièce ($V_{pièce}$), directement accessible à partir du modèle CAO, et le volume de la pièce brute. Si le brut est un produit moulé, ce qui souvent le cas pour des outillages d'emboutissage dans l'industrie automobile, ce volume peut être directement explicité dans le cahier des charges de définition de l'outillage. Dans le cas contraire, nous estimons le volume du brut par le volume du parallélépipède englobant la pièce finie (de dimensions LX_{max} , LY_{max} et LZ_{max}) :

$$V_{brut} = LX_{max} \times LY_{max} \times LZ_{max}$$

Notons que dans certains cas, le brut n'est pas constitué par le parallélépipède englobant la pièce finie, mais par un cylindre englobant. Dans ces conditions, le volume du brut est estimé par la relation suivante :

$$V_{brut} = \frac{\pi \times (LX_{max}^2 + LY_{max}^2)}{4} \times LZ_{max}$$

L'indice $C(c)^-$ correspond au rapport entre la quantité de copeaux et le volume estimé de la pièce brute, il s'agit donc directement d'une valeur adimensionnelle et bornée entre 0 et 1. Plus la valeur est élevée et plus la pièce sera considérée comme complexe à usiner (du point de vue de cet indice). La Figure 64 présente la procédure de calcul de l'indice.

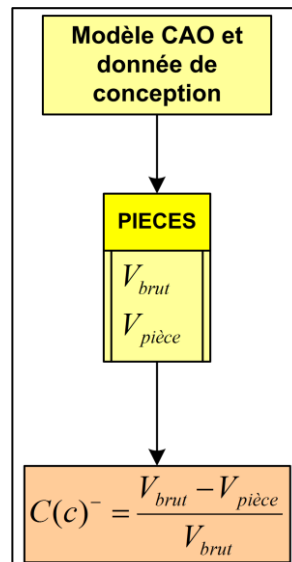
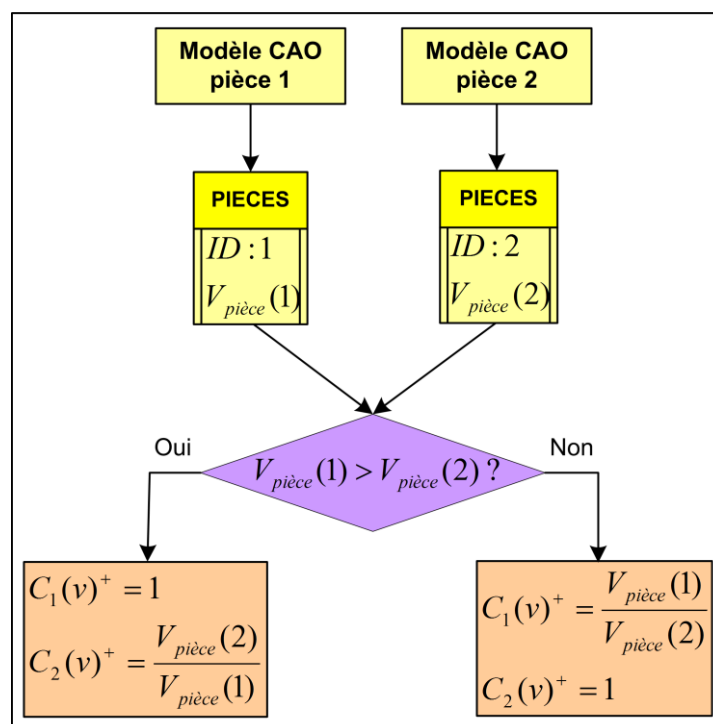


Figure 64. Calcul de l'indice $C(c)^-$.

4.2.9. Indice pour l'ajout de matière lié au volume de la pièce

Le volume d'une pièce a un impact fort sur la durée de fabrication d'une pièce par ajout de matière.

En revanche, nous ne pouvons pas définir, dans l'absolu, le degré de complexité de fabrication d'une pièce directement à partir de son volume. Sauf dans le cas où le volume de la pièce à fabriquer est supérieur au volume fabricable par la machine, mais cet aspect est déjà traité avec le calcul de l'indice $C(d)^+$. Ainsi, pour tenir compte du volume comme paramètre induisant de la complexité de fabrication, il est nécessaire de réaliser des mesures relatives. L'indice alors défini en liaison avec le volume de la pièce est noté $C(v)^+$ et sa valeur définitive ne pourra être calculée que dans un cas de comparaisons entre plusieurs CAO. Ce qui sera le cas lors d'applications de la méthodologie de conception d'outillages modulaires puisque plusieurs conceptions seront comparées d'un point de vue complexité de fabrication (conception monobloc, conception des modules). La procédure de calcul est détaillée dans la Figure 65 pour le cas où les complexités de fabrication de deux conceptions sont analysées.

Figure 65. Calcul de l'indice $C(v)^+$.

4.2.10. Indice pour l'ajout de matière lié aux surfaces de peau

Cet indice est basé sur un phénomène observé dans les fabrications par ajout de matière. Les surfaces de la pièce en contact avec l'extérieur ne sont pas fabriquées de la même façon que le volume intérieur. En effet, pour gagner du temps dans la fabrication sans diminuer les performances mécaniques des pièces, le volume intérieur est souvent fabriqué en ne fusionnant pas la poudre à toutes les couches. Par exemple, seulement une couche sur trois est fusionnée dans le cas de la machine EOS Xtend 250 pour réaliser le cœur des pièces.

La quantité de surfaces de la pièce en contact avec l'extérieur (la peau) joue un rôle important dans la durée totale de fabrication.

C'est pourquoi nous définissons un indice global de complexité de fabrication lié à la quantité de surface de peau, noté $C(s)^+$, et déterminé à partir de l'aire des surfaces extérieures de la pièce.

De même que pour l'indice lié au volume de la pièce en ajout de matière présenté au paragraphe précédent, nous ne pouvons pas utiliser cette donnée directement, de façon absolue. Ainsi l'indice $C(s)^+$ sera également utilisé dans les phases de comparaisons et sa valeur adimensionnelle et normée ne pourra être calculée définitivement qu'en comparant plusieurs conceptions. La procédure de calcul est très similaire à celle présentée pour $C(v)^+$ sur la Figure 65, en remplaçant $V_{pièce}(i)$ par $A_{pièce}(i)$.

4.2.11. Indice local pour l'ajout de matière lié à la hauteur

En parallèle de l'influence du volume sur la durée de fabrication, la hauteur de la pièce joue également un rôle primordial dans la durée totale dans le cas d'une fabrication par couches successives de matière.

Ce sont les zones de la pièce de plus haute altitude (dans la direction normale aux couches) qui vont être fabriquées en dernier et donc conditionner la durée de fabrication.

À partir de ce constat, nous avons mis en place un indice local lié à la hauteur de la zone considérée par rapport au plateau de fabrication. Il est calculé, pour tous les octants gris ou noirs, par le rapport entre l'altitude du centre de gravité de l'octant considéré et la hauteur maximale compatible avec la machine. Avec la définition des axes X, Y et Z précédemment utilisée, il s'agit des coordonnées des centres de gravité sur l'axe Z, et de la dimension $Z_{machine}$. La Figure 66 illustre alors la procédure de calcul de l'indice $C_i(h)^+$.

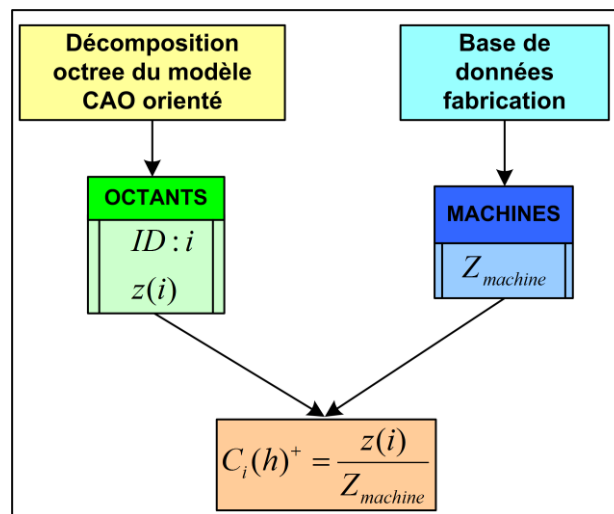


Figure 66. Calcul de l'indice $C_i(h)^+$.

4.2.12. Indice pour l'ajout de matière lié à la distance par rapport au centre

Nous avons vu que pour une réalisation sur une machine à technologie lit de poudre il existait une variation de la qualité des pièces obtenues en fonction de leur position sur le plateau de fabrication, due sans doute au principe même de réalisation. Au centre du plateau, le laser apporte son énergie dans un cercle lié au diamètre focal. En s'éloignant du centre grâce à l'inclinaison des miroirs, le cercle a tendance à se transformer en ellipse, comme on le voit sur les vues de dessus proposées sur la Figure 67.

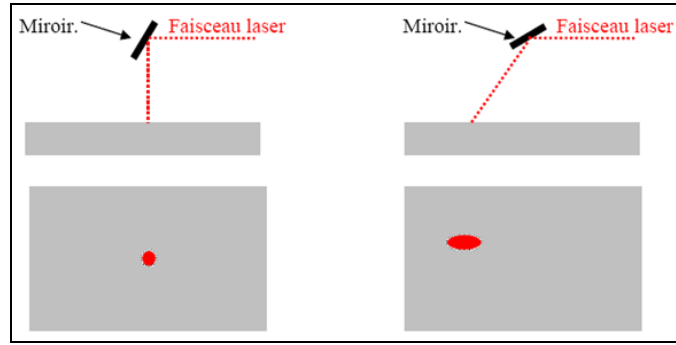


Figure 67. Explication des défauts liés à l'éloignement par rapport au centre du plateau de fabrication [PES06].

Il existe une distance par rapport au centre du plateau de fabrication au-delà de laquelle il sera délicat d'assurer un haut niveau de qualité.

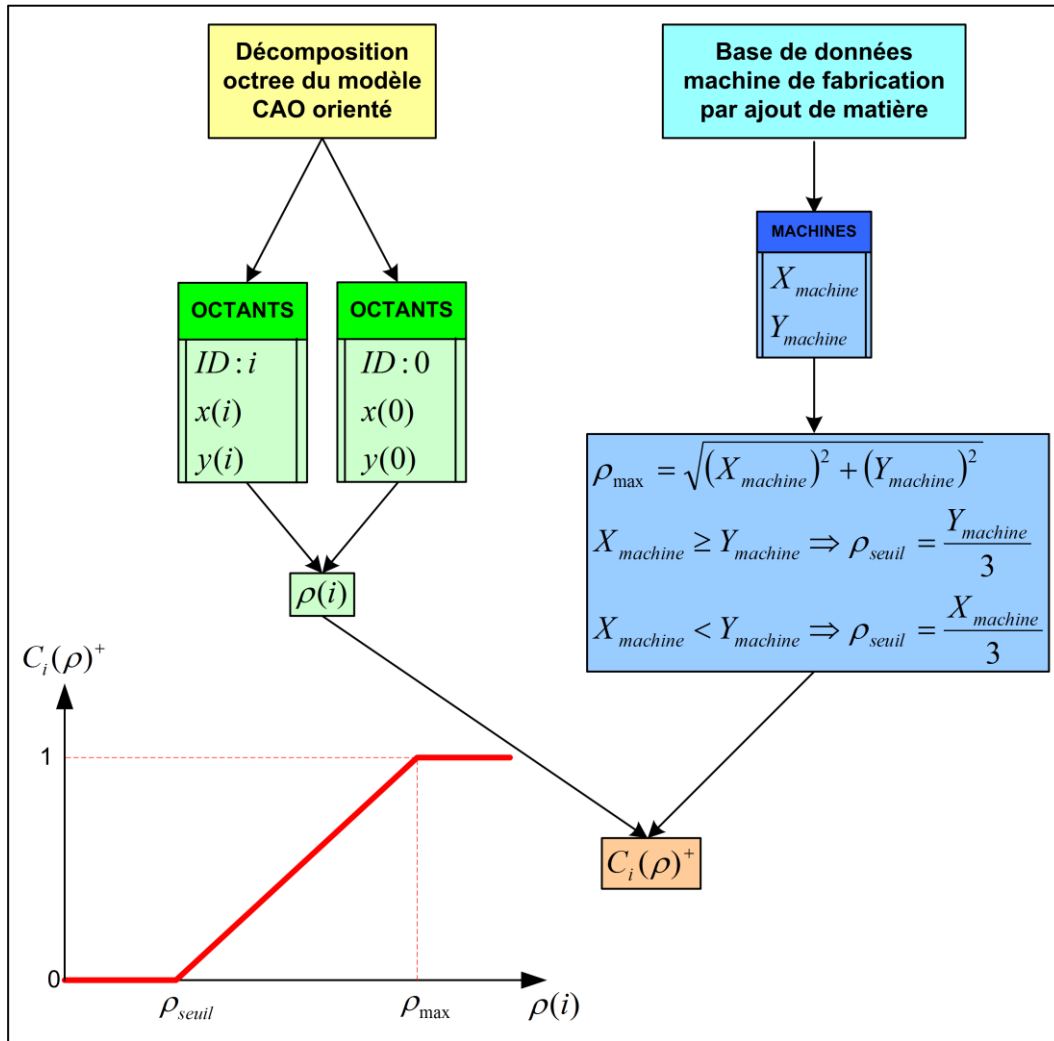
Ainsi, nous définissons un indice local (noté $C_i(\rho)^+$), qui est calculé à partir de la distance entre le centre de gravité de l'octant et le centre du plateau de fabrication, dans le plan des couches (XY avec nos conventions). Pour estimer la position des octants par rapport au centre du plateau, deux hypothèses peuvent être émises :

- soit la pièce est fabriquée de telle sorte que les coordonnées en X et Y de son centre de gravité correspondent à celles du centre du plateau de fabrication, dans ce cas on calcule les distances entre les coordonnées X et Y du centre de gravité de l'octant i ($x(i)$ et $y(i)$) et celles du centre de gravité de la pièce ;
- soit la pièce est fabriquée de telle sorte qu'elle est centrée sur le plateau de fabrication, dans ce cas on calcule les distances entre les coordonnées X et Y du centre de gravité de l'octant i et celles de l'octant 0.

Pour une pièce parfaitement symétrique, les deux hypothèses sont exactement équivalentes. Par contre, s'il y a des différences majeures dans la répartition de matière dans la direction des couches, il peut devenir judicieux de choisir la première solution, car elle va minimiser les écarts liés au défaut mis en évidence ci-dessus. Dans notre étude, nous ne sommes pas allés plus loin dans l'analyse de la répartition de matière, mais nous pouvons conserver cette idée car elle paraît originale et ne semble pas avoir été très étudiée lors des méthodes de choix de direction de fabrication par ajout de fabrication. Pour la suite, nous utiliserons donc la deuxième hypothèse pour le calcul de cet indice, et la distance du centre de gravité de l'octant i (notée ρ_i) se détermine alors avec la relation suivante :

$$\rho_i = \sqrt{(x(i) - x(0))^2 + (y(i) - y(0))^2}$$

À partir du calcul de ces distances, l'indice de complexité $C_i(\rho)^+$ est calculé pour tous les octants gris et noirs, et on souhaite obtenir une valeur adimensionnelle et normée. La distance au-delà de laquelle les défauts apparaissent est estimée à 100 mm pour une machine EOS Xtend 250, qui a un plateau de dimensions 250 mm x 250 mm [PES06]. Nous définissons alors la valeur seuil, notée ρ_{seuil} , comme valant 1 / 3 de la plus petite dimension du plateau, et la valeur maximale, notée ρ_{max} . Ces valeurs sont calculées pour la machine de fabrication supposée. Ce choix de machine est réalisé à partir de l'indice $C(d)^+$, il s'agit de la machine, choisie à partir de la base de données, qui a le plus faible indice de coût et pour laquelle $C(d)^+ < 1$. L'indice est calculé avec la procédure complète présentée sur la Figure 68.

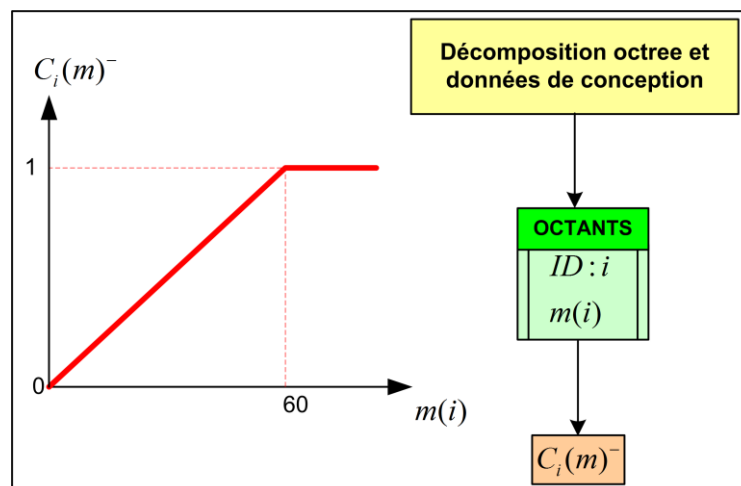
Figure 68. Procédure de calcul $C_i(\rho)^+$.

4.2.13. Indice pour l'usinage lié à la nature des matériaux

Après tous les indices précédents qui sont définis à partir des paramètres morphologiques, nous intégrons un indice lié à la nature des matériaux. Nous faisons alors le constat suivant :

Une zone dans un matériau dont la dureté est élevée va nécessiter un outil de coupe plus cher et une vitesse d'avance réduite, ce qui augmente la complexité de fabrication.

Ainsi, nous définissons un indice local lié à la dureté du matériau. À partir d'une décomposition octree, nous associons l'indice $C_i(m)^-$ à chaque octant gris. Cet indice est calculé à partir de la dureté du matériau maximale des surfaces contenues dans l'octant. Cela suppose donc que les données de conception soient renseignées avec la dureté du matériau dans chaque zone de l'outillage, ce qui permet de calculer la valeur de $m(i)$, dureté maximale exprimée dans l'échelle HRc de la surface contenue dans l'octant i . La valeur de 60 HRc est une valeur limite couramment admise dans la littérature [KEC03] [COL03]. L'indice local $C_i(m)^-$ sera donc calculé pour tous les octants gris avec la procédure de la Figure 69.

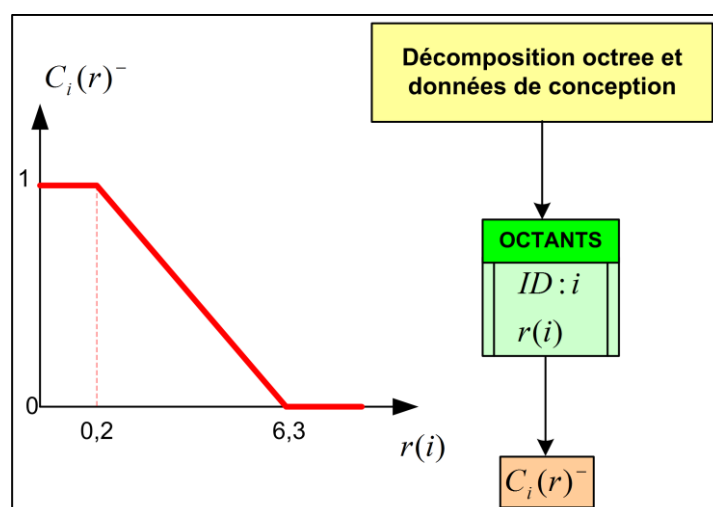
Figure 69. Calcul de l'indice $C_i(m)^-$.

4.2.14. Indice pour l'usinage lié à l'état de surface

Nous avons également travaillé sur l'intégration de paramètres liés aux spécifications, notamment les critères d'état de surface.

Une zone pour laquelle un état de surface précis est requis (faible valeur de rugosité) va nécessiter plusieurs opérations d'usinage, notamment une finition avec une faible avance.

Ce constat nous conduit alors à déterminer un indice local pour l'usinage, lié à l'état de surface, noté $C_i(r)^-$. Il est calculé de façon très similaire à l'indice précédent sur la dureté des matériaux. En effet, l'analyse bibliographique concernant les limites technico-économique des procédés du chapitre 2 nous a conduit à établir une valeur limite de rugosité arithmétique qu'il est possible d'obtenir en usinage. Il s'agit d'un R_a de $0,2 \mu\text{m}$ [JEG03]. Nous basons alors cet indice sur les valeurs de R_a que les données de conception imposent pour chaque zone de l'outillage. Nous utilisons donc la variable $r(i)$ qui est la valeur en μm de la rugosité arithmétique minimum pour les surfaces contenues dans l'octant i gris. L'indice est alors calculé avec la procédure présentée sur la Figure 70. Une valeur de $6,3 \mu\text{m}$ pour R_a n'est pas difficile à obtenir, c'est pourquoi c'est la valeur pour laquelle l'indice $C_i(r)^-$ vaut 0.

Figure 70. Calcul de l'indice $C_i(r)^-$.

4.2.15. Perspectives : la création de nouveaux indices

À la vue du nombre de paramètres de conception qui induisent de la complexité de fabrication, il nous est difficile de proposer un indice abouti pour chacun. Ainsi, certains indices restent encore à développer, comme par exemple les indices liés aux matériaux dans le cas d'une fabrication par ajout de matière, et sur lesquels il pourrait être particulièrement intéressant de travailler dans le cas d'une fabrication multimatériaux. De plus, les indices basés sur des paramètres liés à des spécifications géométriques ou dimensionnelles n'ont également pas été encore établis.

D'autres indices en liaison avec l'orientation des surfaces seraient également très intéressants à développer. En effet, l'orientation des surfaces permet de définir, dans le cas de l'usinage, si une machine-outil 3 axes est suffisante pour réaliser l'ensemble des surfaces en un seul posage ou s'il est nécessaire de passer à une machine 4 ou 5 axes, d'avoir recours à de multiples posages, ce qui engendre évidemment une augmentation du coût et une difficulté supplémentaire pour assurer un haut niveau de qualité [DAS96]. Toujours dans le cas de l'usinage, l'évolution de l'orientation des surfaces contiguës permet aussi de définir un niveau de complexité de fabrication, puisque de fortes variations dans ces orientations vont produire de fortes altérations dans la vitesse des axes (accélérations, décélérations, changement de sens), augmentant alors la durée d'usinage [TER05]. Et pour les pièces fabriquées par ajout de matière, l'analyse de l'orientation des surfaces de peau permet de définir la meilleure orientation de la pièce dans l'espace de travail et de connaître alors les zones pour lesquelles la fabrication de supports sera nécessaire. Ces zones vont alors devenir complexes à fabriquer, puisqu'elles vont induire un coût et un temps supplémentaires [LEP03] (la matière utilisée pour le support, la durée de fabrication et d'enlèvement de celui-ci), et la zone de contact pièce / support ne présente en général pas des propriétés de qualité équivalentes au reste de la pièce, ou alors au prix d'une opération de post-traitement gourmande en ressources (électroérosion à fil par exemple). L'analyse des orientations pourrait se faire à l'aide des directions d'ouvertures des octants.

4.2.16. Tableau récapitulatif des indices qui sont développés

En guise de synthèse, le Tableau 7 répertorie les indices qui ont fait l'objet d'un développement abouti. Une nouvelle fois, cette liste d'indices ne représente pas de façon exhaustive l'ensemble des caractéristiques à prendre en compte pour évaluer la complexité de fabrication.

Indice	Lié à	Type	Procédé	Paragraphe
$C(d)^-$	dimensions maximales	Global	Usinage	§4.2.3
$C(d)^+$	dimensions maximales	Global	Ajout de matière	§4.2.4
$C_i(d_{\min})^+$	dimensions minimales	Local	Ajout de matière	§4.2.6
$C_i(f)^-$	flexibilité de l'outil de coupe	Local	Usinage	§4.2.7
$C(c)^-$	quantité de copeaux	Global	Usinage	§4.2.8
$C(v)^+$	volume	Global	Ajout de matière	§4.2.9
$C(s)^+$	surfaces de peau	Global	Ajout de matière	§4.2.10
$C_i(h)^+$	hauteur	Local	Ajout de matière	§4.2.11
$C_i(\rho)^+$	distance par rapport au centre	Local	Ajout de matière	§4.2.12
$C_i(m)^-$	dureté des matériaux	Local	Usinage	§4.2.13
$C_i(r)^-$	état de surfaces	Local	Usinage	§4.2.14

Morphologie

Matériaux

Spécifications

Tableau 7. Tableau récapitulatif des indices développés.

5. Synthèse sur l'analyse de la complexité de fabrication

La première partie du présent chapitre a permis de définir concrètement ce que nous entendions par « complexité de fabrication » et de mettre en évidence la nécessité d'en avoir une double vision, globale et locale, pour l'évaluer le plus rigoureusement possible. Pour l'analyse locale, il est nécessaire de se baser sur un découpage du modèle CAO de l'outillage en différentes parties, différentes zones.

De prime abord, les décompositions en entités pourraient convenir. En effet, elles sont très répandues dans des applications de DFM et d'automatisation de la phase de préparation de la fabrication. Par contre, elles ne sont pas adaptées à une application d'outillages hybrides (formes complexes et procédés par ajout et enlèvement de matière). Nous avons alors opté pour une décomposition neutre, la décomposition octree. En associant ensuite un indice de complexité de fabrication aux octants, ou plus précisément à la fraction de l'outillage contenue dans les octants nous avons une vision précise des zones les plus complexes à fabriquer.

Les indices développés sont basés sur l'analyse des paramètres de conception qui vont avoir un impact sur le temps, le coût ou la qualité de fabrication, donc sur la complexité de fabrication. Des algorithmes ont été mis en place afin d'automatiser les procédures de calcul des indices. Ils sont composés d'une partie extraction des caractéristiques de conception de l'outillage (directement à partir du modèle CAO, ou de la décomposition octree, et des données de conception), d'un lien avec une base de données fabrication (comprenant des données sur les machines de fabrication et les outils de coupe), puis d'un calcul d'une valeur adimensionnelle et normée, qui constitue alors précisément l'indice.

Dans le cadre de ces travaux, nous n'avons pas développé complètement la totalité des indices prévus. Cela est principalement dû à la difficulté de l'automatisation de la récupération des informations des données de conception. En effet, il ne faut pas perdre de vue que nous souhaitons que ces indices puissent être calculés dès la phase de conception et de façon la plus automatique possible, afin de s'affranchir des contraintes de subjectivités existantes dès lors que l'utilisateur a des choix à faire en faisant appel à ses compétences. C'est pourquoi nous avons souhaité mettre l'accent, dans ce travail de thèse, sur la création d'indices en liaison avec les paramètres morphologiques dont les informations (géométrie, dimensions) peuvent être récupérées relativement aisément grâce à une procédure informatique fonctionnant en liaison avec un logiciel de CAO.

Cette procédure nous permet alors de disposer d'une analyse globale et locale de la complexité de fabrication d'une pièce, pour un procédé par ajout ou enlèvement de matière. Elle est au centre de la méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides. Ainsi, toute la méthode a été implémentée au sein d'une maquette informatique, développée sous Visual Basic et SolidWorks. Le chapitre suivant présente cette maquette, les résultats des analyses de complexité de fabrication sur des pièces-test simples et les possibilités d'utilisation de ces analyses dans une application des points de vue modulaires et hybrides.

Chapitre 4

Méthode de conception d'outillages modulaires hybrides

Ce chapitre correspond au développement de la maquette informatique implémentée au sein d'un logiciel de CAO. La procédure ainsi créée reprend la méthodologie de conception précédemment exposée, basée sur l'analyse de complexité de fabrication à l'aide des indices définis dans le chapitre précédent.

Nous n'utiliserons pas la totalité des indices définis, c'est pourquoi la première partie liste ceux qui ont été réellement développés dans la maquette informatique.

Dans une deuxième partie, nous allons présenter la structuration des données de la maquette informatique. Devant la multiplicité des provenances des informations à traiter, nous avons souhaité organiser l'ensemble de façon cohérente avec une représentation par objets. Nous exposerons également le choix des supports logiciels utilisés et la constitution de la base de données fabrication.

Puis nous verrons précisément comment peut être utilisée la maquette informatique et quels sont les cheminements permettant de passer d'un outillage monobloc à un outillage modulaire hybride dont la complexité de fabrication est réduite. Nous développerons alors trois exemples, dans les parties trois, quatre et cinq. Le premier correspond à l'application du point de vue modulaire pour diminuer la complexité de fabrication d'un outillage dans le cas où un seul procédé de fabrication est retenu. Le deuxième exemple s'intéresse à la combinaison de procédés par ajout et enlèvement de matière. Enfin, le troisième exemple présente la détection d'incompatibilités entre le modèle numérique et le procédé de fabrication choisi.

Ces différentes utilisations sur des pièces-test permettent de déceler les limites liées à la méthodologie. Nous les dévoilerons dans la sixième partie, avant de mettre en avant dans la septième partie le large panel d'apports que procure la méthodologie.

1. Préambule

Dans le chapitre précédent, de nombreux indices ont été développés. Cependant, en l'état actuel de ce travail de thèse, tous n'ont pas pu être implémentés dans la maquette informatique. Nous avons concentré nos efforts sur certains d'entre eux, il s'agit alors d'un compromis entre la pertinence des indices et leurs facilités d'intégration à la maquette informatique afin de disposer automatiquement des résultats de calculs. Nous laissons ainsi de côté les indices ne dépendant pas des paramètres morphologiques de conception de l'outillage.

Nous avons également décidé de ne pas prendre en compte l'indice $C_i(d_{\min})^+$ correspondant aux dimensions minimales limitantes pour une fabrication additive. En effet, les exemples industriels sur lesquels nous avons travaillé par la suite ne présentaient pas de spécificités géométriques et dimensionnelles correspondant à une valeur 1 de cet indice. Il en est de même pour l'indice $C_i(\rho)^+$, car sa valeur est toujours nulle pour les exemples que nous avons traités. Cela est dû au fait suivant : soit les pièces sont de dimensions trop petites et restent sous le seuil d'apparition des défauts, soit les pièces sont plus grandes et nécessitent alors l'utilisation d'une machine avec un plus grand espace de travail. Dans ce cas, la machine de fabrication envisagée est une machine avec une technologie par projection de poudre, et cet indice n'a de sens que pour les technologies lit de poudre.

Nous pouvons cependant remarquer qu'une fois la méthodologie mise en place et la maquette informatique opérationnelle, il est tout à fait possible d'ajouter un ou plusieurs indices en programmant les algorithmes de calcul et en les intégrant à la maquette actuelle.

Dans ces conditions, les indices utilisés pour les analyses de complexité de fabrication qui suivent sont listés dans le Tableau 8.

Indice	Lié à	Type	Procédé
$C(d)^-$	dimensions maximales	Global	Usinage
$C(d)^+$	dimensions maximales	Global	Ajout de matière
$C_i(f)^-$	flexibilité de l'outil de coupe	Local	Usinage
$C(c)^-$	quantité de copeaux	Global	Usinage
$C(v)^+$	volume	Global	Ajout de matière
$C(s)^+$	surfaces de peau	Global	Ajout de matière
$C_i(h)^+$	hauteur	Local	Ajout de matière

Tableau 8. Tableau récapitulatif des indices effectivement utilisés dans la maquette informatique.

De plus, dans ce chapitre, nous travaillerons à partir de modèles numériques de pièces-test, et non directement à partir des modèles CAO d'outillages. En effet, ce chapitre vise à présenter les différentes possibilités d'utilisation de la méthodologie qui ne se cantonne pas simplement à une application aux outillages. C'est pourquoi toutes les études qui sont réalisées dans ce chapitre sont basées sur les analyses de complexité de fabrication de pièces-test, représentatives de ce qui existe dans le domaine de l'outillage. Les applications de la méthodologie de conception à des cas concrets d'outillages industriels seront présentées dans le cinquième chapitre.

2. Présentation générale de la maquette informatique

2.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons formuler et argumenter nos choix quant à la création de la maquette informatique qui est l'outil associé à notre méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides (présentée sur la Figure 11). Il s'agit de créer des procédures permettant d'automatiser les différentes étapes de la méthodologie, avec un accent particulier mis sur les analyses de complexité de fabrication. La Figure 71 reprend les données d'entrée et de sortie d'une telle procédure.

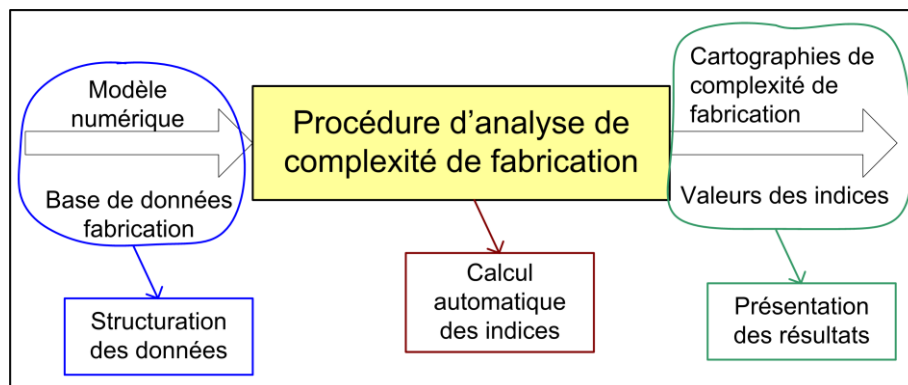


Figure 71. Données d'entrée et de sortie de la procédure d'analyse de complexité de fabrication.

Cette figure met en avant la nécessité de disposer d'une structuration claire des données, car elles peuvent émaner de sources diverses (extraites directement du modèle CAO de l'outillage, dépendantes d'une base de données fabrication, ou encore générées automatiquement dans une étape intermédiaire du calcul des indices de complexité). De plus, les résultats, obtenus grâce aux calculs des indices, doivent apparaître de façon la plus simple et explicite possible. Ils seront présentés sous formes de valeurs des indices globaux et de cartographies de distribution des valeurs des indices locaux, appelées cartographies de complexité de fabrication.

Ainsi nous allons développer quatre points dans cette partie. Premièrement, les choix que nous avons faits en termes de supports logiciels ne sont pas anodins car ils conditionnent d'une part la facilité d'utilisation de la maquette, et tous les aspects propres à la programmation d'autre part.

Deuxièmement, afin d'organiser clairement les différentes données que notre procédure doit traiter, nous avons opté pour une représentation par objets de l'ensemble des données.

Nous présenterons ensuite la conception de l'interface de dialogue homme-machine.

Et enfin, nous allons mettre en regard la méthodologie de conception avec la maquette informatique.

2.2. Choix des logiciels

2.2.1. Support principal : SolidWorks

Notre méthode se veut utilisable dès la conception des outillages, en s'inscrivant dans une démarche de Design For Manufacturing. À ce titre, le point de départ est le modèle numérique de l'outillage monobloc. Nous avons alors logiquement choisi de développer la maquette informatique comme un module d'un logiciel de CAO, donc accessible directement lors de l'utilisation du logiciel.

À partir de ce constat, plusieurs solutions existaient : Catia V5, SolidWorks, TopSolid, PowerShape, etc. Notre choix s'est porté sur SolidWorks car ce logiciel concentre différents avantages, liés notamment à sa relative simplicité d'utilisation et sa liaison directe avec un support de programmation, Visual Basic Applications pour SolidWorks.

Une réflexion ultérieure nous a conduits à montrer l'importance de se dégager d'un logiciel particulier ou d'une version de logiciel. En ce sens, il aurait sans doute été préférable de réaliser la partie programmation dans une plateforme externe au logiciel, style Delphi ou Python, bien que cela impose une mise en œuvre plus lourde. Cependant, les travaux étaient déjà bien engagés dans SolidWorks, et pour ce travail de thèse en génie mécanique, nous nous sommes concentrés sur les aspects méthodologie et faisabilité de l'approche plutôt que sur un développement informatique optimisé. Nous sommes donc restés fidèles à SolidWorks, version 2007.

Le point d'entrée de la méthodologie est un modèle CAO enregistré au format .sldprt. Il est nécessaire de disposer d'un modèle volumique, le modèle surfacique étant insuffisant pour réaliser correctement les décompositions octree. Notons que ce modèle peut avoir été créé sous n'importe quel logiciel de CAO, du moment que nous puissions en avoir un modèle volumique, par exemple converti au format d'échange STEP AP203, puis importé dans SolidWorks. Notons également que le calcul de certains indices nécessite une orientation particulière du modèle, comme cela a été précisé dans le chapitre précédent.

2.2.2. Aspects programmations : Visual Basic Applications

Ce choix s'imposait tout seul car il s'agit d'une composante de SolidWorks : Visual Basic Applications (VBA) pour SolidWorks. En effet, des macros peuvent être enregistrées à partir d'actions effectuées dans le logiciel de CAO, ce qui permet de lire directement la traduction des actions réalisées dans le langage de programmation. L'automatisation de ces tâches peut donc être grandement facilitée par l'utilisation de Visual Basic. Nous sommes donc restés sur ce choix pour les aspects programmations.

2.2.3. Présentation des résultats : Microsoft Excel

Afin de présenter les résultats des analyses de complexité de fabrication, nous avons choisi d'utiliser le tableur Excel de la suite Microsoft Office. Cela permet à tout utilisateur de la méthodologie de pouvoir disposer de résultats lisibles pour les études. En outre, de cette façon, les résultats sont consultables en dehors de la maquette informatique, ce qui est très utile pour alimenter les choix de conception modulaire hybride, même en dehors d'un logiciel spécifique de CAO.

De plus, il est tout aussi facile de créer des macros par enregistrement de tâches sous Excel que sous SolidWorks ce qui simplifie considérablement bon nombre d'aspects liés à la mise en forme des résultats.

2.3. Représentation par objets

2.3.1. Introduction

Afin de classer les différentes sources de données utilisées dans la procédure, une représentation du modèle de données par objets a été mise en place. Il s'agit de distinguer les informations appartenant à la pièce en elle-même (comme son volume, par exemple, qui est utile pour calculer l'indice $C(v)^+$), des informations provenant de la base de données fabrication (la course des axes de la

machine-outil, etc.). De plus, la procédure va créer beaucoup d'objets transparents pour l'utilisateur mais indispensables aux calculs, notamment tous les octants et leurs caractéristiques (la couleur, les directions d'ouvertures, etc.).

Ce type d'organisation par objets est utilisé de façon très abondante dans la littérature liée à la programmation (Programmation Orientée Objet, OOP, que l'on retrouve par exemple dans les travaux de l'université de l'Iowa relatifs au DFM [FEN95]). La programmation par objets contraste avec la programmation traditionnelle dans laquelle on crée des fonctions qui opèrent sur des données. L'un des problèmes de cette approche traditionnelle est que les fonctions varient plus souvent que les données. La réutilisation des fonctions est difficile et il est nécessaire de connaître toute la structure du programme avant de pouvoir en modifier une partie. Par opposition, la programmation par objets consiste à créer des méthodes qui interviennent autour d'un groupe de données. L'un des principes de la programmation par objets est d'avoir un couplage faible, cela veut dire que chaque objet utilise peu d'autres objets. De plus, chaque objet s'apparente à une boîte noire dont on peut modifier l'intérieur sans en modifier toutes les propriétés ni le comportement. Cela permet donc de bouleverser les attributs des objets sans de grandes répercussions sur les autres objets ni sur l'application globale. Ceci est très avantageux en phase de création et de développement d'une application informatique qui fait appel à de nombreuses données de provenances diverses, ce qui est notre cas.

Nous avons conçu par objets notre application informatique sans pour autant faire appel à des outils dédiés, en utilisant le vocabulaire suivant :

- Objet : un objet est un item/unité/entité, réel ou abstrait, unique et identifiable avec un rôle bien défini ;
- Classe : une classe est un ensemble d'objets qui ont une structure commune et un comportement commun. Un objet est une instance d'une classe ;
- Attribut : un attribut est une propriété observable des objets d'une classe ;
- Méthode : une méthode est une action qui peut changer les valeurs de certains attributs d'un objet.

Ainsi pour notre méthodologie, nous avons réalisé une abstraction des différentes parties intervenant dans le problème afin de définir les 6 classes suivantes, ainsi que leurs attributs et méthodes.

2.3.2. La classe PIECES

Cette classe est composée des modèles volumiques des outillages ou des modules composant les outillages dont on cherche à analyser la complexité de fabrication. Les attributs sont les données extraites du modèle CAO qui vont être utiles pour les calculs des indices. Les méthodes proposées pour cette classe sont :

- Définir le volume du brut : soit il est renseigné car le brut est une pièce moulée, soit il est calculé par le produit des 3 attributs de longueurs maximales ;
- Décomposer en octants : il s'agit là de réaliser la décomposition octree pour calculer un indice local.

Chaque entité de cette classe peut se représenter sous la forme d'une fiche comme celle de la Figure 72.

PIECES
<i>ID : string</i> <i>LXmax : \mathbf{R}^+</i> <i>LYmax : \mathbf{R}^+</i> <i>LZmax : \mathbf{R}^+</i> <i>V_{brut} : \mathbf{R}^+</i> <i>V_{pièce} : \mathbf{R}^+</i> <i>A_{pièce} : \mathbf{R}^+</i>
Définir le volume du brut Décomposer en octants

Figure 72. Attributs et méthodes de la classe PIECES.

2.3.3. La classe MACHINES

Cette classe correspond à ce que nous avons appelé dans le chapitre précédent la base de données machines. Elle est constituée par la description des caractéristiques des machines de fabrication. Les attributs sont les suivants (Figure 73) :

- Un identifiant, qui permet de classer les machines dans l'ordre de leur coût relatif ;
- Le nom de la machine ;
- Le type, qui permet de différencier les machines suivant leur technologie. Dans notre cas, nous n'avons que deux types possibles, usinage ou ajout de matière, donc nous définissons l'attribut type comme une variable binaire ;
- Les dimensions maximales du volume de travail suivant les 3 directions (course des axes dans le cas d'une machine d'usinage 3 axes à structure sérielle) ;
- Un attribut d'indice de coût relatif de la machine qui est déterminé grâce à la méthode Calculer l'indice de coût relatif.

MACHINES
<i>ID : \mathbf{N}^*</i> <i>Nom : string</i> <i>Type : usinage / ajout</i> <i>X_{machine} : \mathbf{R}^+</i> <i>Y_{machine} : \mathbf{R}^+</i> <i>Z_{machine} : \mathbf{R}^+</i> <i>C_{machine} : [0,1]</i>
Calculer l'indice de coût relatif

Figure 73. Attributs et méthode de la classe MACHINES.

Pour calculer l'indice de coût relatif, il est nécessaire d'avoir défini plusieurs machines du même type. En effet, cet indice est utile pour comparer différentes machines entre elles et privilégier, si la conception de l'outillage le permet, la machine ayant l'indice de coût relatif le plus faible. Cet indice est calculé en comparant les espaces de travail de chaque machine. Sans information supplémentaire sur les machines, celle qui aura le plus petit espace de travail sera considérée comme la machine la plus économique, donc à utiliser en priorité si les dimensions de l'outillage à fabriquer l'autorisent.

Ainsi, pour N machines du même type, les indices sont ordonnés de la façon suivante, à partir du produit des dimensions du volume de travail suivant les trois directions :

$$\begin{aligned} \forall k \in \{1, \dots, N-1\} \quad \prod_{i \in \{X, Y, Z\}} i_{machine}(k) < \prod_{i \in \{X, Y, Z\}} i_{machine}(k+1) &\Rightarrow C_{machine}(k) < C_{machine}(k+1) \\ \forall k \in \{1, \dots, N-1\} \quad \prod_{i \in \{X, Y, Z\}} i_{machine}(k) > \prod_{i \in \{X, Y, Z\}} i_{machine}(k+1) &\Rightarrow C_{machine}(k) > C_{machine}(k+1) \end{aligned}$$

Si les volumes sont équivalents, ce sont les dimensions du plan de travail (plan XY) qui jouent, et s'il n'y a pas de différence, les deux machines auront le même indice de coût, comme cela est explicité par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \forall k \in \{1, N-1\} / \prod_{i \in \{X, Y, Z\}} i_{machine}(k) &= \prod_{i \in \{X, Y, Z\}} i_{machine}(k+1) \\ \prod_{i \in \{X, Y\}} i_{machine}(k) < \prod_{i \in \{X, Y\}} i_{machine}(k+1) &\Rightarrow C_{machine}(k) < C_{machine}(k+1) \\ \prod_{i \in \{X, Y\}} i_{machine}(k) > \prod_{i \in \{X, Y\}} i_{machine}(k+1) &\Rightarrow C_{machine}(k) > C_{machine}(k+1) \\ \prod_{i \in \{X, Y\}} i_{machine}(k) &= \prod_{i \in \{X, Y\}} i_{machine}(k+1) \Rightarrow C_{machine}(k) = C_{machine}(k+1) \end{aligned}$$

Une fois que l'ordre des indices de coût est défini, il convient de les calculer. Cela est fait en fonction du nombre de machines de même type. En notant $rang(k)$ l'ordre de l'indice (k) ($rang = 1$ pour l'indice le plus faible, $rang = N$ pour le plus élevé), nous pouvons calculer les indices de coût relatif des machines avec la relation suivante :


$$C_{machine}(k) = \frac{rang(k)}{N}$$

$$\text{En particulier, } C_{machine}(k) = \frac{1}{N} \text{ pour } k \text{ mini, } C_{machine}(k) = 1 \text{ pour } k \text{ maxi}$$

Cet indice de coût relatif prend en compte, à l'heure actuelle, uniquement les dimensions de l'espace de travail, mais on peut envisager de le complexifier en induisant d'autres données (coût d'achat de la machine, d'amortissement, de consommation électrique, etc). Le but est toujours le même : privilégier l'utilisation de la machine ayant l'indice de coût relatif le plus faible.

Ces fiches machines sont créées, sous forme d'un classeur Excel comprenant plusieurs feuilles (une par machine) avant de réaliser les analyses de complexité de fabrication. La Figure 74 présente un exemple d'une fiche machine, sous forme de la feuille Excel créée pour la machine, et sous forme d'un objet de la classe MACHINES. La première est utilisée pour visualiser et compléter les caractéristiques des différentes machines, la seconde est générée par la procédure et correspond à une représentation ordonnée des caractéristiques précédentes.

HERMLE C30U		
Typologie	Usinage	
Courses	axe X	650
	axe Y	600
	axe Z	500
Indice de coût relatif		0.66



MACHINES	
ID :	2
Nom :	HERMLE C30U
Type :	usinage
$X_{machine}$:	650
$Y_{machine}$:	600
$Z_{machine}$:	500
$C_{machine}$:	0,66
Calculer l'indice de coût relatif	

Figure 74. Exemple d'une fiche machine.

Pour nos applications, nous avons créé 5 fiches machines. Il s'agit de trois machines d'usinage (Vernier CV600, Hermle C30U et Mikron HPM 800) et deux machines de fabrication par ajout de matière, l'une avec la technologie lit de poudre (EOSINT M 250 Xtend) et l'autre avec la technologie dépôt de poudre (Irepa-Huron). Cette dernière machine est un prototype, issu de la collaboration entre IrepaLaser et Huron pour l'IRCCyN, qui nous a été livrée très récemment (septembre 2009).

2.3.4. La classe OUTILS

Dans le cas où un procédé d'usinage par enlèvement de matière est utilisé, il va falloir définir, en plus des machines, la gamme d'outils de coupe à disposition. Les attributs qui composent cette classe sont un identifiant, un type (fraise deux tailles, torique ou hémisphérique, qui sont les catégories d'outils de coupe les plus courantes pour l'usinage d'outillages), un diamètre, une longueur seuil (qui correspond à la longueur minimale de sortie de l'outil du porte-outil, c'est-à-dire la distance minimale entre le nez de la broche et la pointe de l'outil) et un rayon de bout dans le cas d'outils toriques. On retrouve également comme attribut un indice de coût relatif. Une fois de plus, cet indice de coût relatif est utile pour privilégier les outils les plus standards par rapport aux autres. Nous considérons qu'à diamètre égal, une fraise deux tailles est moins coûteuse à l'utilisation qu'une fraise torique, qui elle-même est moins coûteuse que la fraise hémisphérique de même diamètre. Ainsi, l'indice de coût relatif est déterminé simplement de la façon suivante :

$$\text{Outil}.i.Type = 2T \Rightarrow C_{\text{outil}}(i) = \frac{1}{3}$$

$$\text{Outil}.i.Type = tor \Rightarrow C_{\text{outil}}(i) = \frac{2}{3}$$

$$\text{Outil}.i.Type = hem \Rightarrow C_{\text{outil}}(i) = 1$$

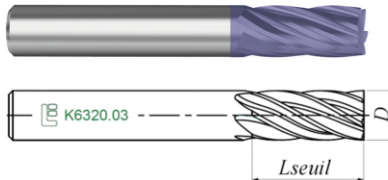
Une nouvelle fois, l'indice de coût pourrait prendre en compte d'autres caractéristiques, liées concrètement au prix de l'outil de coupe, à son matériau et son revêtement, etc. Dans notre application, nous en sommes restés à cette classification en fonction de la typologie de l'outil.

Cette classe OUTILS ne comporte pas de méthode. La Figure 75 présente les attributs de cette classe.

OUTILS
<i>ID : string</i> <i>Type : 2T / tor / hem</i> $\phi : \mathbf{R}^+$ $L_{seuil} : \mathbf{R}^+$ $rb : \mathbf{R}^+$ $Coutil : \frac{1}{3} / \frac{2}{3} / 1$

Figure 75. Attributs de la classe OUTILS.

De façon similaire à ce qui existe pour les machines, les fiches outils sont créées, à partir d'un classeur Excel comprenant plusieurs feuilles (une par outil). La Figure 76 présente deux exemples de fiches outil, sous forme des feuilles Excel créées, et sous forme d'objets de la classe OUTILS. Les fiches outils peuvent être renseignées rapidement à partir des catalogues de fabricants d'outils de coupe. Pour nos applications, nous nous sommes basés sur le catalogue d'un fabricant local, E. Leclerc à Fougères. Nous avons sélectionné un ensemble cohérent d'outils de coupe parmi les fraises deux tailles, toriques et hémisphériques afin de disposer d'une gamme complète de diamètres.

K 6320.03.200				<table><tr><th>OUTILS</th></tr><tr><td>ID : 6320.03.200 Type : 2T $\phi : 20$ Lseuil : 38 Coutil : $\frac{1}{3}$</td></tr></table>	OUTILS	ID : 6320.03.200 Type : 2T $\phi : 20$ Lseuil : 38 Coutil : $\frac{1}{3}$
OUTILS						
ID : 6320.03.200 Type : 2T $\phi : 20$ Lseuil : 38 Coutil : $\frac{1}{3}$						
Typologie	2 Tailles					
D	20					
Lseuil	38					
Indice de coût relatif	0.33					

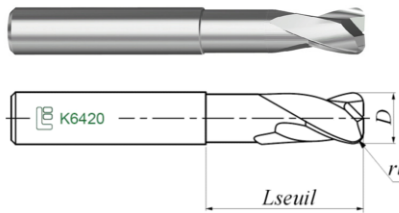
K 6420.200.40				<table><tr><th>OUTILS</th></tr><tr><td>ID : 6420.200.40 Type : tor $\phi : 20$ Lseuil : 54 rb : 4 Coutil : $\frac{2}{3}$</td></tr></table>	OUTILS	ID : 6420.200.40 Type : tor $\phi : 20$ Lseuil : 54 rb : 4 Coutil : $\frac{2}{3}$
OUTILS						
ID : 6420.200.40 Type : tor $\phi : 20$ Lseuil : 54 rb : 4 Coutil : $\frac{2}{3}$						
Typologie	Torique					
D	20					
Lseuil	54					
rb	4					
Indice de coût relatif	0.66					

Figure 76. Exemples de fiches outil.

2.3.5. La classe OCTANTS

Une autre classe est créée, elle concerne directement la décomposition octree nécessaire pour les calculs d'indices locaux. Les objets de cette classe sont tous les octants qui sont créés lors d'une

décomposition octree. Les attributs de cette classe reprennent toutes les données dépendant des octants et servant à calculer les indices. Il s'agit :

- D'un identifiant, c'est directement le n° de l'octant ;
- Du niveau de décomposition auquel l'octant appartient ;
- De la position dans le repère de la pièce de l'octant, illustrée par les coordonnées de son centre, qui est utilisée pour la construction de l'octant dans SolidWorks ;
- Des dimensions de l'octant, dans les trois directions ;
- De la couleur, blanc, noir ou gris ;
- Des valeurs de rf et rc , les rayons de courbure des surfaces concaves contenues dans les octants gris ;
- Des valeurs de $Lmin$ et $Dmax$;
- Des valeurs des indices locaux effectivement calculées lors des études.

Les méthodes qui appartiennent à cette classe permettent de calculer les valeurs des indices locaux. Pour être applicables, elles nécessitent que la décomposition octree soit complète au niveau demandé car elles font appel à l'ensemble des octants composant la décomposition du modèle CAO. Ces méthodes sont les suivantes :

- Déterminer les voisins directs ;
- Déterminer les directions d'ouvertures ;
- Déterminer les voisins indirects ;
- Calculer $Dmax$;
- Calculer $Lmin$.

La Figure 77 reprend les différents attributs et méthodes de la classe OCTANTS.

OCTANTS	
<i>ID : N</i>	
<i>Niveau : N</i>	
<i>x : N</i>	<i>Lx : N</i>
<i>y : N</i>	<i>Ly : N</i>
<i>z : N</i>	<i>Lz : N</i>
<i>Couleur : Blanc / Noir / Gris</i>	
<i>rf : R⁺</i>	<i>Lmin : R⁺</i>
<i>rc : R⁺</i>	<i>Dmax : R⁺</i>
<i>C(f)⁻ : [0,1]</i>	
<i>C(h)⁺ : [0,1]</i>	
Déterminer les voisins directs	
Déterminer les directions d'ouvertures	
Déterminer les voisins indirects	
Calculer $Lmin$	
Calculer $Dmax$	

Figure 77. Attributs et méthodes de la classe OCTANTS.

Le chapitre précédent expliquait les procédures de calculs associées à ces méthodes. En ce qui concerne les attributs, nous formulons quelques remarques quant à leurs méthodes de détermination.

Le niveau de décomposition auquel l'octant appartient est connu directement grâce au numéro de l'octant. En effet, avec les conventions adoptées, le nombre de chiffres composant le numéro de

l'octant correspond au niveau de création de l'octant. C'est ainsi qu'au niveau 1 sont créés les octants n° 1 à 8, au niveau 2 les octants n° 11 à 88, etc. Le niveau se calcule donc avec la formule suivante :

$$Octant.i.Niveau = n \in \mathfrak{Z}^* / 1 < Ent\left(\frac{Octant.i.ID}{10^{n-1}}\right) < 10$$

$Ent(x)$ est la partie entière de x .

Les attributs de positions et de dimensions des octants sont calculés à partir des caractéristiques de l'octant 0, du numéro de l'octant et du niveau de décomposition auquel il appartient. Pour faciliter la compréhension, nous avons représenté sur la Figure 78 les calculs des positions et des dimensions des octants composant le premier niveau de décomposition en deux dimensions pour la forme utilisée en exemple dans le chapitre précédent.

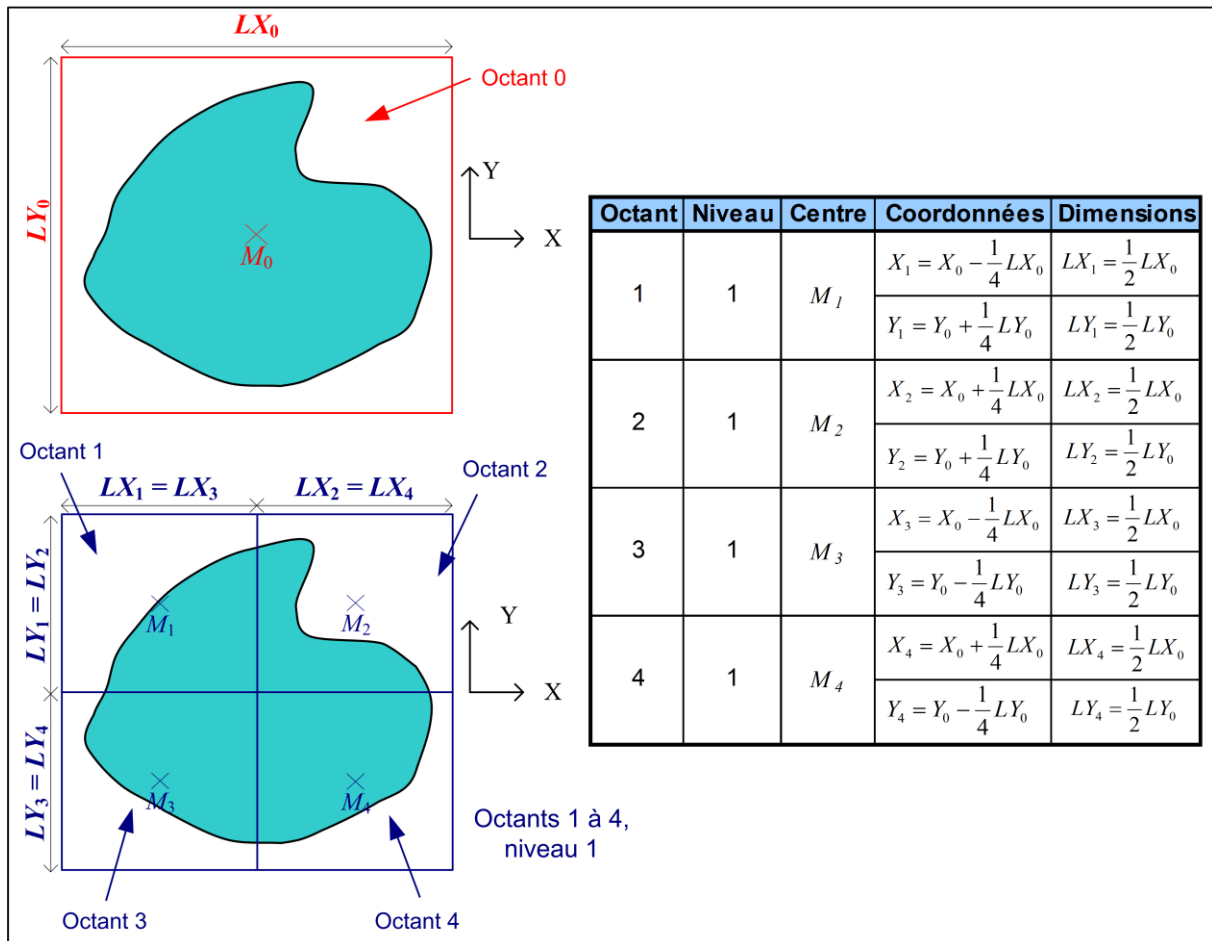


Figure 78. Calculs des positions et dimensions des octants au niveau 1.

Ainsi, à partir d'un octant i , on peut calculer les positions de ses 8 sous-octants $ij, j \in \{1, \dots, 8\}$, en généralisant en trois dimensions grâce aux relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 Octant.i1.x &= Octant.i3.x = Octant.i5.x = Octant.i7.x = Octant.i.x - \frac{1}{2^{Octant.i.Niveau+2}} Octant.0.Lx \\
 Octant.i2.x &= Octant.i4.x = Octant.i6.x = Octant.i8.x = Octant.i.x + \frac{1}{2^{Octant.i.Niveau+2}} Octant.0.Lx \\
 Octant.i1.y &= Octant.i2.y = Octant.i5.y = Octant.i6.y = Octant.i.y + \frac{1}{2^{Octant.i.Niveau+2}} Octant.0.Ly \\
 Octant.i3.y &= Octant.i4.y = Octant.i7.y = Octant.i8.y = Octant.i.y - \frac{1}{2^{Octant.i.Niveau+2}} Octant.0.Ly \\
 Octant.i1.z &= Octant.i2.z = Octant.i3.z = Octant.i4.z = Octant.i.z - \frac{1}{2^{Octant.i.Niveau+2}} Octant.0.Lz \\
 Octant.i5.z &= Octant.i6.z = Octant.i7.z = Octant.i8.z = Octant.i.z + \frac{1}{2^{Octant.i.Niveau+2}} Octant.0.Lz
 \end{aligned}$$

En ce qui concerne les dimensions des octants, elles sont déterminées directement à partir de celles de l'octant 0 et du niveau des octants grâce aux relations suivantes :

$$\forall j \in \{1, \dots, 8\} \begin{cases} Octant.ij.Lx = \frac{1}{2^{Octant.i.niveau+1}} Octant.0.Lx \\ Octant.ij.Ly = \frac{1}{2^{Octant.i.niveau+1}} Octant.0.Ly \\ Octant.ij.Lz = \frac{1}{2^{Octant.i.niveau+1}} Octant.0.Lz \end{cases}$$

La couleur des octants est définie grâce à une comparaison de volume entre l'octant d'une part et l'intersection entre le modèle volumique de la pièce et l'octant d'autre part. Pour cela, la procédure crée l'octant à partir des données de positions et de dimensions précédentes, et détermine le volume de l'intersection entre l'octant et la pièce par une opération de combinaison de corps volumiques. La couleur est alors arrêtée avec les relations suivantes :

$$Volume(pièce \cap Octant.i) = 0 \Rightarrow Octant.i.Couleur = Blanc$$

$$Volume(pièce \cap Octant.i) = Octant.i.Lx \times Octant.i.Ly \times Octant.i.Lz \Rightarrow Octant.i.Couleur = Noir$$

$$Volume(pièce \cap Octant.i) < Octant.i.Lx \times Octant.i.Ly \times Octant.i.Lz \Rightarrow Octant.i.Couleur = Gris$$

Une fois que ces attributs ont été établis pour les objets de la classe OCTANTS, les méthodes peuvent être utilisées, ce qui permettra de remplir un tableau identique au Tableau 6, utile pour calculer ensuite la valeur des indices.

2.3.6. La classe ETUDES

La classe ETUDES est également élaborée. Les attributs sont un identifiant, un nom de répertoire (qui correspond au répertoire d'enregistrement des fichiers créés lors de l'analyse de complexité de fabrication), le procédé utilisé pour réaliser l'étude (dans notre cas, 2 type de procédés possibles : 0, correspondant à l'usinage et 1 correspondant à l'ajout de matière). Les autres attributs correspondent aux valeurs des indices. Il y a les indices globaux, les cartographies de distributions des valeurs des indices locaux, ainsi que deux valeurs qui sont calculées à partir des indices locaux dans le but d'avoir une estimation quantitative de l'ensemble des valeurs locales. Il s'agit de :

- $C(f)_{\max}$ qui correspond à la valeur maximale ;

- $C(f)_{moy}^-$ qui correspond à une moyenne volumique calculée avec la relation suivante :

$$C(f)_{moy}^- = \frac{\sum_i (C_i(f)^- \times Volume(pi\grave{e}ce \cap Octant.i))}{\sum_i Volume(pi\grave{e}ce \cap Octant.i)}$$

Cette moyenne volumique est inspirée par les travaux de W.W. Cooper relatifs à la mesure de la complexité. Il calcule la complexité d'un produit à partir de la moyenne des complexités des pièces, pondérées par la part du volume occupé par la pièce dans le volume total du produit [COO92].

Les méthodes associées à cette classe sont les calculs des indices de complexité de fabrication. La Figure 79 illustre les attributs et méthodes de la classe ETUDES.

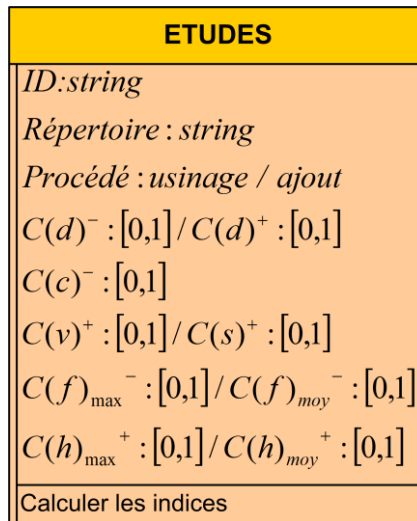


Figure 79. Attributs et méthodes de la classe ETUDES.

2.3.7. La classe COMPARAISONS

Enfin, la classe COMPARAISONS est indispensable pour quantifier les gains entre différentes conceptions d'outillage, c'est-à-dire les évolutions des valeurs des indices entre plusieurs études de complexité de fabrication (par exemple entre une conception monobloc et modulaire hybride).

Les attributs des objets de cette classe sont un identifiant, le nombre d'études à comparer, et les évolutions relatives des valeurs des indices entre les différentes études, déterminées avec la méthode Calculer les évolutions, comme précisé sur la Figure 80.

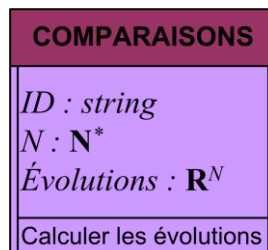


Figure 80. Attributs et méthode de la classe COMPARAISONS.

2.3.8. Organisation et liens des différentes classes

Avec ces 6 classes définies, nous avons mis en place la structure de l'ensemble des données nécessaires à l'utilisation de la méthodologie. Il faut désormais préciser les liens entre ces différentes classes. Pour cela, nous utilisons un formalisme inspiré par le modèle conceptuel de données associé à

la méthode MERISE (méthode de conception et de réalisation de systèmes d'informations). Les conventions de liaisons entre les classes sont précisées dans la Figure 81.

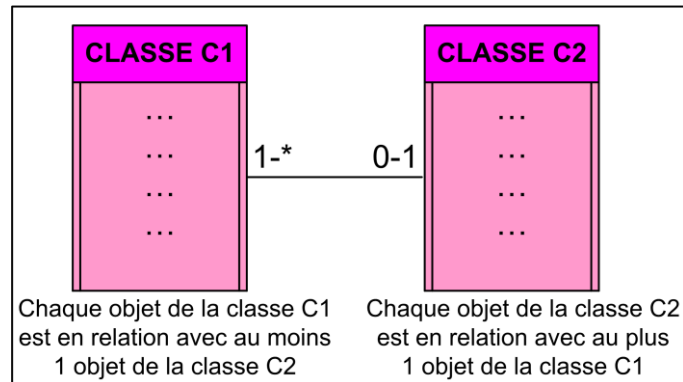


Figure 81. Conventions d'écriture des liaisons entre classes.

Avec cette convention, nous obtenons la Figure 82, qui constitue l'organisation générale de la représentation par objets du modèle de données.

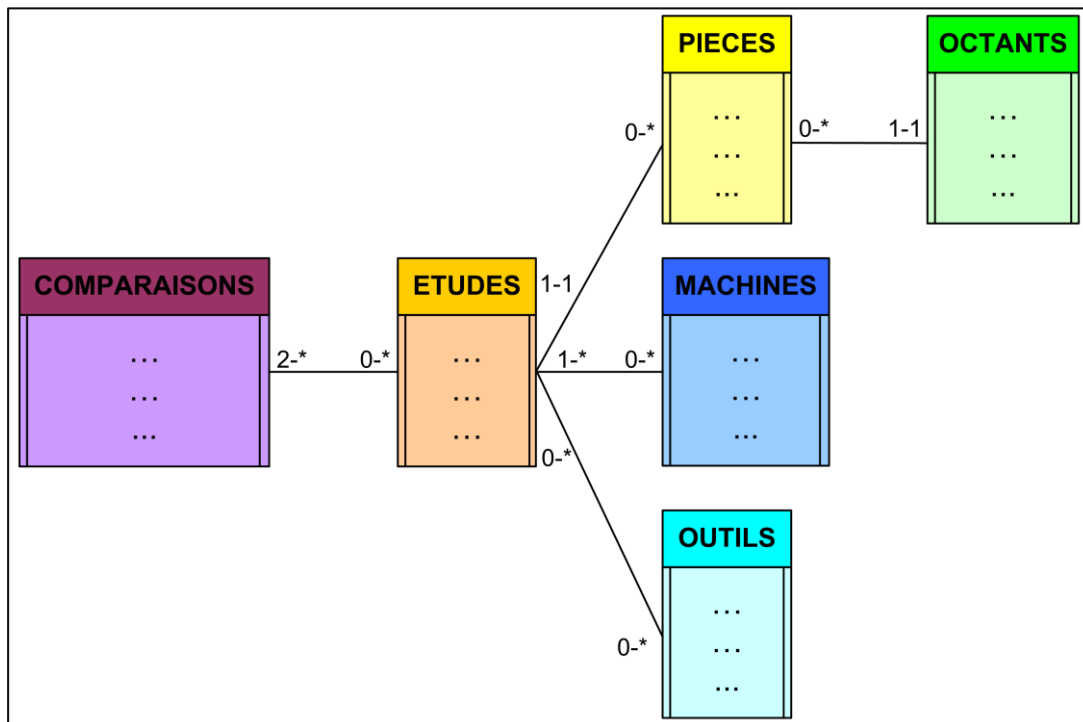


Figure 82. Représentation par objets du modèle de données.

2.4. Conception de l'interface

2.4.1. Interface principale

La maquette informatique doit être très simple à utiliser et faire appel à un minimum d'informations à remplir par l'utilisateur. L'interface de dialogue homme-machine qui a été conçue est représentée sur la Figure 83.

Figure 83. Interface homme-machine pour l'analyse de la complexité de fabrication.

- ID : c'est une chaîne de caractère, choisie par l'utilisateur, qui permet d'identifier l'étude ;
- Répertoire de travail : de nombreux fichiers seront créés au cours de l'étude (les octants, qui seront enregistrés en tant que pièce SolidWorks et tous les fichiers résultats), donc l'utilisateur choisit le répertoire qu'il souhaite utiliser pour cela, ce qui lui permet de retrouver rapidement des fichiers résultats en recherchant l'identifiant de l'étude dans le répertoire de travail ;
- Pièce : l'utilisateur indique le chemin d'accès au fichier CAO de la pièce (un outillage monobloc, ou un module d'un outillage modulaire par exemple) ;
- Procédé : à ce stade, l'utilisateur choisit un procédé (enlèvement ou ajout de matière) pour réaliser l'analyse de complexité de fabrication. En effet, comme on l'a vu précédemment, les indices à calculer ne sont pas les mêmes dans le cas d'une réalisation par usinage ou par ajout de matière. Les deux analyses sont possibles, mais elles devront être faites successivement ;
- Fiches machines : l'utilisateur indique le chemin d'accès à un fichier Excel contenant des données sur les machines qui peuvent être utilisées pour réaliser la pièce, ce fichier étant créé en amont ;
- Fiches outils : seulement dans le cas où le procédé défini est l'usinage, l'utilisateur doit indiquer le chemin d'accès à un fichier Excel contenant des données sur les outils de coupe qui peuvent être utilisés pour réaliser la pièce, de façon similaire à la case Fiches machines ;
- Lancer l'analyse : c'est la procédure de calcul des indices proprement dite ;
- Faire une comparaison : une fois que plusieurs études ont été réalisées (sur l'outillage monobloc et sur les différents modules constituant l'outillage modulaire hybride), l'utilisateur peut comparer les résultats des analyses afin de déterminer quantitativement le gain entre les études (sixième étape de la méthodologie de conception).

2.4.2. Interface correspondant aux calculs des indices

Lorsque l'analyse est lancée, une deuxième interface s'affiche (Figure 84), dépendant du type de procédé choisi (par enlèvement ou ajout de matière).

Figure 84. Interfaces de calcul des indices de complexité de fabrication.

Elle permet de choisir les indices qui vont être calculés. Pour les indices globaux, le résultat est « direct » contrairement aux indices locaux qui nécessitent de passer par la phase de décomposition octree. Pour cette opération de décomposition, il est nécessaire de préciser le niveau actuel de décomposition. À l'initialisation, il n'y a pas encore de niveau créé, la première étape consiste donc à définir le niveau 0 de la décomposition (en renseignant les dimensions et la position du parallélépipède englobant). Il s'agit de préciser, via l'interface présentée sur la Figure 85, la position du centre de l'octant 0 et ses dimensions dans les 3 directions. Cette opération de définition de la cellule cubique ou parallélépipédique englobant l'outillage est, à l'heure actuelle, manuelle, c'est-à-dire que c'est l'utilisateur qui relève ces valeurs sur la CAO pour les renseigner sur l'interface.

Figure 85. Interface de création du niveau 0 de la décomposition en octree.

Les résultats des calculs des indices et des cartographies de distribution des valeurs pour les indices locaux s'affichent sous forme d'une feuille Excel, enregistrée dans le répertoire de travail de l'étude.

2.4.3. Interface correspondant aux comparaisons entre les études

Si l'utilisateur souhaite réaliser une comparaison entre différentes études préalablement réalisées, une nouvelle interface s'affiche. Elle permet de renseigner le chemin d'accès aux différentes études à comparer. La comparaison peut s'effectuer entre deux études monobloc ou bien entre une étude monobloc et un ou plusieurs modules. Les résultats s'enregistrent dans une feuille Excel, sous formes d'histogrammes montrant l'évolution en pourcentage des valeurs des indices entre les différentes études.

Figure 86. Interface de comparaisons entre différentes études.

2.4.4. Liens entre la maquette informatique et la méthodologie de conception

En suivant les différentes étapes de la maquette informatique, l'utilisateur va réaliser des analyses de complexité de fabrication pour un outillage monobloc puis pour des modules constituant un outillage modulaire hybride et pourra observer l'estimation quantitative du gain. La Figure 87 représente alors ces différentes étapes, en reprenant la figure illustrant la méthodologie générale (Figure 11).

La partie concernant l'application des points de vue modulaires et hybrides n'est pas encore implémentée au sein de la maquette informatique. Il convient alors à l'utilisateur de définir le modèle CAO des modules et leur procédé de fabrication en s'appuyant sur les analyses de complexité de fabrication (calculs d'indices et cartographies de distribution des valeurs) pour valider ou modifier ses choix. La maquette informatique ainsi développée ne reprend donc pas la totalité de la méthodologie de conception. Elle se révèle toutefois être un outil performant d'aide au choix entre conception monobloc et modulaire hybride, comme nous allons le voir dans les parties suivantes en exposant différentes études sur des pièces-test représentatives de ce qui est courant en fabrication d'outillages.

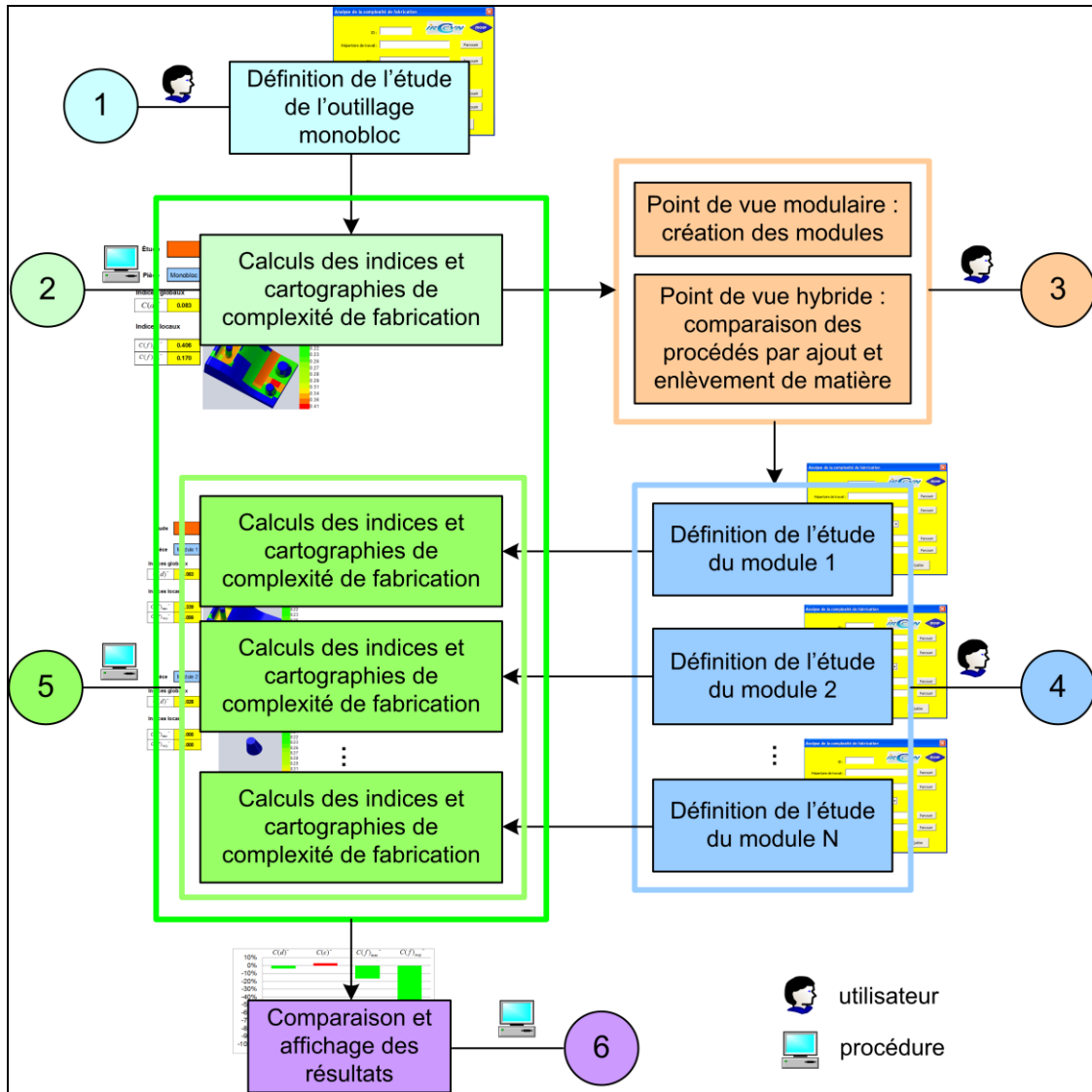


Figure 87. Liens entre la maquette informatique et la méthodologie de conception en 6 étapes.

3. Premier exemple sur une pièce-test

3.1. Présentation de l'étude

Cette première étude cherche à mettre en avant les possibilités d'utilisation de la méthodologie et de la maquette informatique associée. Pour cette étude, nous avons défini un modèle volumique d'une pièce-test, puis nous avons utilisé la procédure d'analyse de complexité de fabrication. À la lueur des résultats de cette analyse, nous définissons deux modules constituant alors la pièce-test conçue de façon modulaire. Puis nous nous servons une seconde fois de la procédure afin d'évaluer la complexité de fabrication des modules. La conclusion nous est apportée par la comparaison des deux analyses.

3.2. Choix de la pièce-test

L'examen de diverses pièces-test développées pour des applications d'usinage, de fabrication par ajout de matière et d'outillages nous a poussés à décrire notre pièce-test comme un agencement de formes élémentaires se retrouvant habituellement dans ces domaines. Nous avons choisi de travailler, pour ce premier exemple, sur une pièce-test représentative de ce qu'il existe au niveau de la fabrication d'outillages réalisés par usinage. C'est pourquoi nous avons conçu la pièce-test de la Figure 88 [KER07a].

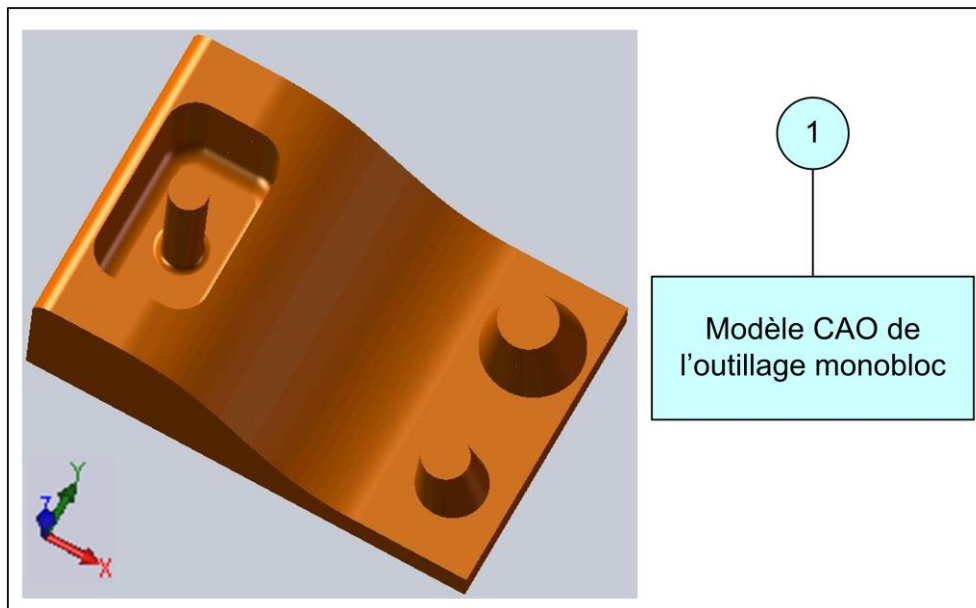


Figure 88. Pièce-test utilisée pour le premier exemple.

Nous remarquons que cette pièce est bien composée d'un agencement de formes élémentaires, qui ne s'apparentent pourtant pas à un aménagement d'entités simples. En effet, nous avons créé les deux bossages de la partie droite, qui ne sont ni cylindriques, ni coniques et n'entrent ainsi pas des standards de définition par entités. Pour autant, ce type de géométrie peut être utilisé dans une application d'outillage de mise en forme, et doit donc pouvoir être analysé au même titre que des géométries plus conventionnelles, telles que celles de la partie gauche.

Le repère de construction du modèle CAO de cette pièce-test est déjà correctement orienté par rapport aux obligations liées à l'analyse de complexité de fabrication.

3.3. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la pièce-test monobloc

Nous réalisons la première analyse de complexité de fabrication pour cette pièce-test, pour le procédé d'usinage par enlèvement de matière. Les résultats de cette analyse sont présentés sur la Figure 89*, qui reprend la feuille Excel composant les résultats et créée lors de l'analyse par la maquette informatique.

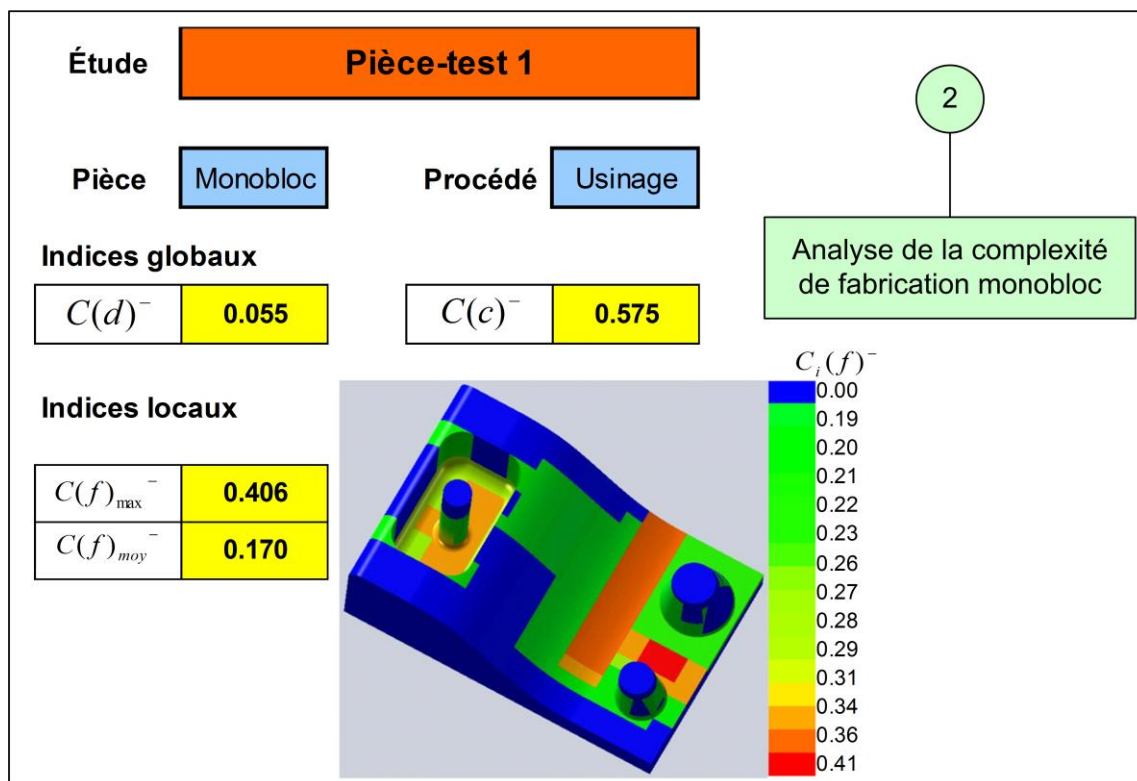


Figure 89*. Résultats pour l'analyse de complexité de fabrication par usinage pour la pièce-test. (Les figures marquées d'un astérisque sont reproduites en annexe pour faciliter leur impression en couleur).

En ce qui concerne l'indice global lié aux dimensions maximales ($C(d)^-$), il est faible car la pièce-test est de dimensions relativement restreintes ce qui permet l'utilisation de la machine-outil avec le plus faible indice de coût relatif (c'est-à-dire le CV600 qui a un indice $C_{\text{machine}}(1) = 0,33$ dans notre base de données).

Pour le calcul de l'indice global lié à la quantité de copeaux ($C(c)^-$), le brut de la pièce est le parallélépipède englobant la pièce car nous ne sommes pas ici dans le cas d'un brut moulé.

Le calcul de l'indice local lié à la flexibilité de l'outil de coupe nécessite une décomposition octree de la pièce. Le niveau maximal de décomposition est fixé à 4, ce qui correspond à des dimensions des plus petits octants représentant la pièce de 7,5 mm x 5 mm x 3,125 mm. Cette précision est suffisante pour cette pièce qui ne présente pas de détails de très faibles dimensions. La représentation des octants gris est réalisée sur la Figure 90. Tous les octants n'ont pas les mêmes dimensions. En effet, pour certains, la décomposition s'est arrêtée au niveau 3 car il ne s'agissait pas d'OSD. Les valeurs locales associées aux octants sont la base de la cartographie de complexité de fabrication. En effet, cette cartographie est tracée pour visualiser la distribution des valeurs de l'indice local. L'échelle de couleurs est déterminée automatiquement, en associant la couleur rouge à la plus grande valeur, et la

couleur bleue à la plus faible. Pour cette pièce-test, $C(f)_{\max} = 0,406$ et $C(f)_{\min} = 0$. Cette cartographie fournit donc une vision précise des zones de l'outillage les plus complexes à fabriquer au regard de l'indice local considéré. En plus de la cartographie, la procédure renvoie la valeur maximale et la moyenne volumique.

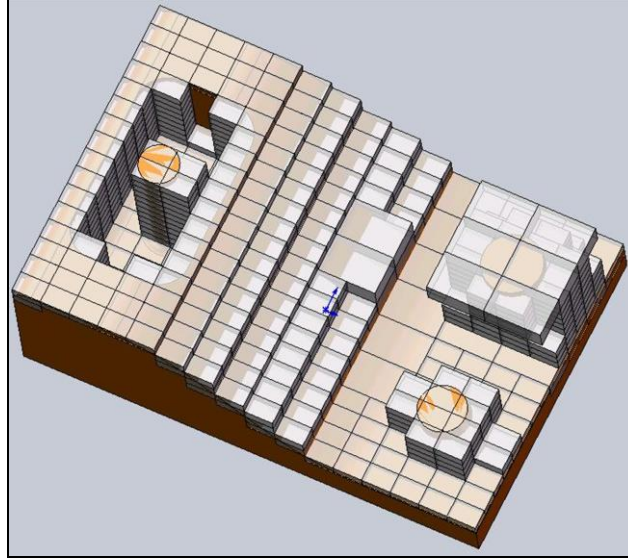


Figure 90. Décomposition octree de la pièce-test – Représentation des octants gris.

3.4. Exploitation des résultats

3.4.1. Objectif

La question qui se pose à ce stade est comment peut-on utiliser les approches modulaires et hybrides pour réduire la complexité de fabrication précédemment évaluée ? L'objectif de cette partie est donc de déterminer quelles sont les valeurs sur lesquelles une approche modulaire peut avoir une incidence et quelles sont celles sur lesquelles une approche hybride est nécessaire. Pour cela, analysons finement les valeurs d'indices. En ce qui concerne les indices locaux, les cartographies mettent en avant les zones où les valeurs sont les plus élevées. Cela permet de nous concentrer sur ces zones et de bien saisir pourquoi les valeurs sont élevées. Le but est alors de déterminer les actions (choix d'un découpage en modules, utilisation d'un autre procédé) qui vont pouvoir diminuer la complexité de fabrication dans ces zones. Cette phase d'exploitation des résultats correspondant à la troisième étape de la méthodologie, qui permet d'aboutir à un modèle numérique des modules. Elle n'est pas à l'heure actuelle automatisée au sein de la maquette informatique.

3.4.2. Exploitation des indices globaux

$C(d)^-$ est lié à l'adéquation entre les dimensions maximales de la pièce-test et la machine-outil choisie, comme le montre la relation suivante :

$$C(d)^- \uparrow \Rightarrow \left\{ \sum_{i \in \{X,Y,Z\}} \frac{C_{machine}(n)}{Li_{\max}} \uparrow \right\} \Rightarrow \left\{ \frac{Li_{\max}}{i_{machine}(n)} \uparrow \right\}$$

Cela signifie que pour diminuer la valeur de cet indice (et donc la complexité de fabrication), il est nécessaire d'entreprendre une des actions suivantes :

- Diminuer $C_{machine}(n)$, ce qui correspond à changer de machine ;
- Diminuer Li_{max} , $i \in \{X,Y,Z\}$, ce qui revient à modifier la conception de la pièce, éventuellement en envisageant une conception en plusieurs modules dont les dimensions sont plus faibles que la pièce monobloc ;
- Augmenter $i_{machine}(n)$, ce qui correspond également à un changement de machine.

Pour notre exemple, $C(d)^-$ a une valeur très faible, nous n'allons donc pas focaliser sur cet indice.

En ce qui concerne l'indice $C(c)^-$, lié à la quantité de copeaux, l'explication d'une valeur élevée peut se trouver grâce à la relation suivante :

$$C(c)^- \uparrow \Rightarrow \frac{V_{brut} - V_{pièce}}{V_{brut}} \uparrow \Rightarrow V_{brut} - V_{pièce} \uparrow$$

Les possibilités de réduction de la complexité de fabrication pour cet indice sont donc les suivantes :

- Diminuer V_{brut} , sans modifier la pièce, en réalisant l'usinage à partir d'une préforme et non à partir d'un brut englobant ;
- Diminuer la différence $V_{brut} - V_{pièce}$, en envisageant une conception de la pièce en modules qui optimiserait la quantité de copeaux. Cela est valable dès qu'une zone augmente particulièrement la quantité de copeaux.

Ici nous choisissons de ne pas « jouer » sur cet indice $C(c)^-$ afin de nous concentrer sur l'indice local.

3.4.3. Exploitation de l'indice local et de la cartographie

Pour l'indice $C_i(f)^-$, nous constatons que la valeur moyenne n'est pas très élevée, mais la cartographie nous révèle qu'il existe cependant des zones très nettement plus complexes à fabriquer que d'autres. Pour cet indice local, le cheminement de pensée qui permet de détailler les raisons qui font que la valeur est élevée est le suivant :

$$C_i(f)^- \uparrow \Rightarrow \frac{L(i)}{D(i)} \uparrow \Rightarrow \begin{cases} L(i) \uparrow \Rightarrow \begin{cases} L_{seuil}(i) \uparrow \\ L_{min}(i) \uparrow \end{cases} \\ D(i) \downarrow \Rightarrow \begin{cases} rf(i) \downarrow \\ rc(i) \downarrow \\ D_{max}(i) \downarrow \end{cases} \end{cases}$$

Par conséquent, si nous cherchons à réduire la complexité de fabrication liée à la flexibilité de l'outil de coupe, il apparaît nécessaire d'opérer une des modifications suivantes, suivant le cas de figure :

- Diminuer $L_{seuil}(i)$, qui est déterminé à partir des données des fiches outils, donc cela implique de modifier la base de données fabrication ;
- Diminuer $L_{min}(i)$, en réalisant au sein d'un module séparé la zone qui augmente cette valeur (qui est la surface d'altitude la plus élevée dans le cas de l'usinage 3 axes) ;
- Augmenter $rf(i)$, ce qui nécessite de modifier la conception de la pièce et qui n'est donc possible que sous réserve de répondre au besoin exprimé dans le cahier des charges ;

- Augmenter $rc(i)$, idem ;
- Augmenter $D_{\max}(i)$, en adoptant un point de vue modulaire afin de fabriquer les différentes zones limitant $D_{\max}(i)$ dans des modules distincts.

Nous voyons clairement que la zone la plus complexe à usiner au regard de cet indice est située entre les deux bossages de la partie droite de la pièce-test (en rouge sur la Figure 89*). S'en suivent la partie entre les bossages et la partie inclinée, puis le fond de la poche de la partie gauche. Si nous détaillons les informations dont nous disposons sur la zone la plus complexe, qui regroupe les 4 octants 4256, 4258, 4265 et 4267, nous obtenons le Tableau 9.

N°	Couleur	Voisins directs	Directions d'ouvertures	Voisins indirects	L_{\min}	D_{\max}	rf	rc	D	L_{seuil}	L	$C(f)^{-}$
4256	Gris	4258,4265, 4268,4285	Z^+, Z^-	2832, 4632	40.625	10	-	-	10	22	40.625	0.406
4258	Gris	4256,4257, 4267,4276	Z^+, Z^-	2832, 4632	40.625	10	-	-	10	22	40.625	0.406
4265	Gris	248,4256, 4266,4267	Z^+, Z^-	2841, 4641	40.625	10	-	-	10	22	40.625	0.406
4267	Gris	247,4251, 4255,4265	Z^+, Z^-	2841, 4641	40.625	10	-	-	10	22	40.625	0.406

Tableau 9. Informations pour les 4256, 4258, 4265 et 4267 de la pièce-test.

Ainsi, les facteurs influençant la valeur de $C_i(f)^{-}$, $i \in \{4256, 4258, 4265, 4267\}$, ne sont pas les rayons de courbure, mais une combinaison entre une grande valeur de $L_{\min}(i)$ et une faible valeur de $D_{\max}(i)$, surtout due à la faible distance entre les octants voisins indirects 2832 - 4632 et 2841 - 4641.

Une approche hybride (utilisation d'un procédé par ajout de matière) n'apporterait pas une réduction de la difficulté de fabrication pour ces zones, car cela ne va permettre pas d'augmenter la distance entre les octants voisins indirects impliqués. En revanche, une approche modulaire peut supprimer ces octants voisins indirects, en réalisant les deux bossages en deux modules différents.

3.4.4. Choix des modules

Au regard de la cartographie et de l'analyse ci-dessus, il apparaît pertinent de réaliser la pièce en deux modules, l'un comprenant uniquement un des deux bossages et l'autre comprenant l'ensemble de la pièce restante. Comme la problématique est la même sur une autre zone de la pièce (zone rendue complexe à cause de la distance limitée entre les voisins indirects d'un bossage et la partie inclinée), nous choisissons la zone que nous allons réaliser séparément, comme le montre la Figure 91.

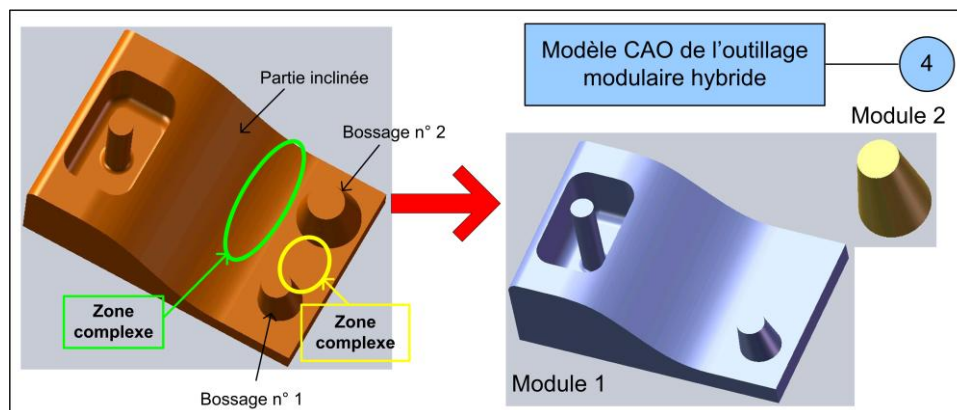


Figure 91. Choix du découpage de la pièce-test en deux modules.

Pour ce premier exemple, nous ne tenons pas compte des contraintes liées à l'assemblage entre les différents modules. Il serait pour cela nécessaire de travailler avec une définition automatique d'assemblages standard entre les modules. Cela peut être réalisé en s'appuyant sur les travaux de M. Rivette qui a défini des Cartes d'Identité d'Assemblages regroupant les caractéristiques des liaisons encastrement par plan prépondérant ou cylindre prépondérant [RIV06]. Cependant, dans l'état actuel de la méthodologie, ces aspects liés à l'assemblage ne sont pas implémentés dans la maquette informatique, et ne sont pas pris en compte dans la définition des modèles numériques des modules.

La suite de la méthodologie consiste à réaliser l'analyse de complexité de fabrication par usinage pour les modules.

3.5. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour les modules

3.5.1. Calculs des indices et cartographies pour les deux modules

Chaque module va être l'objet d'une étude spécifique d'évaluation de la complexité de fabrication. Puis nous regrouperons les résultats afin de pouvoir les comparer aux résultats de l'étude monobloc. Les résultats des études concernant les modules sont présentés sur la Figure 92*.

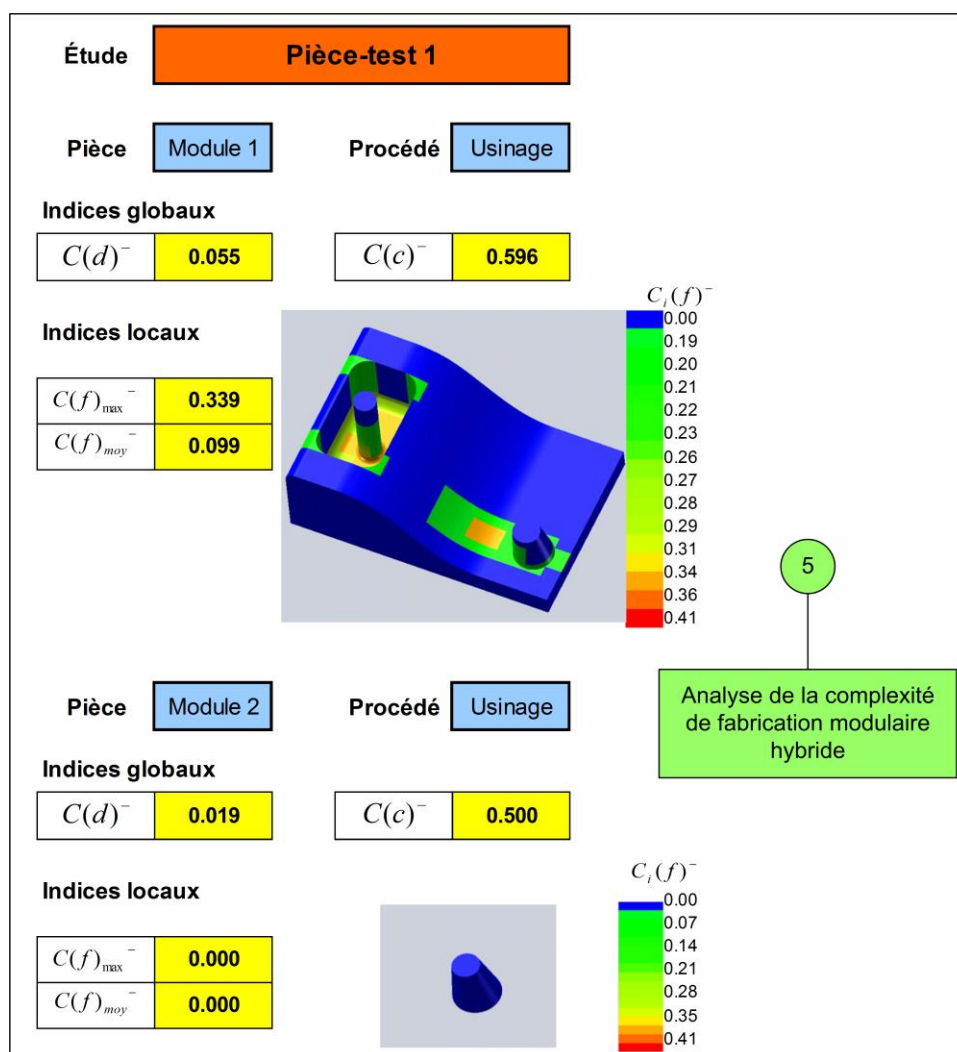


Figure 92*. Résultats de l'analyse de complexité de fabrication pour les modules.

En ce qui concerne le module 1, les dimensions maximales étant les mêmes que la pièce monobloc, l'indice $C(d)^-$ ne varie pas. L'indice lié à la quantité de copeaux va être légèrement supérieur puisqu'il y a un peu plus de volume de matière à enlever par rapport à la pièce monobloc. Pour l'indice $C(f)^-$, on constate d'ores et déjà que la valeur maximale est bien plus faible que pour la pièce monobloc. De plus, comme les cartographies ont été réalisées avec la même échelle de couleurs, on voit bien que la complexité a été réduite dans les zones précédemment les plus complexes.

En ce qui concerne le module 2, sa réalisation par usinage ne pose pas de réels problèmes. En effet, l'encombrement est réduit et sa fabrication n'impose pas de contraintes de flexibilité pour les outils utilisés (d'où la valeur 0 pour les indices $C_i(f)^-$ de tous les octants issus de la décomposition octree du modèle).

3.5.2. Regroupement des deux modules

Ces résultats sont donc observés pour tous les modules considérés individuellement. Pour pouvoir être comparés à l'outillage monobloc, il convient alors de regrouper ces modules. Ainsi, les valeurs des indices pour chaque module vont être regroupées en utilisant la relation suivante :

$$C_{total}(i) = \sum_{j=1}^{N_{mod}} \omega_j C_j(i)$$

$C_{total}(i)$ représente la valeur totale des modules regroupés pour l'indice i , N_{mod} est le nombre de modules composant la pièce modulaire, ω_j est le coefficient de pondération associé au module j et $C_j(i)$ est la valeur de l'indice i pour le module j .

Nous utiliserons comme coefficient de pondération la part du volume du module considéré dans l'outillage complet, calculé de la façon suivante [KER09c] :

$$\forall j \in \{1, \dots, N_{mod}\}, \omega_j = \frac{Volume(mod\ j)}{\sum_{j=1}^{N_{mod}} Volume(mod\ j)}$$

Le calcul de cette valeur totale s'effectue sur les indices globaux et les moyennes volumiques des indices locaux. La valeur totale pour les valeurs maximales des indices locaux correspond à la plus grande des valeurs, sans pondération. Nous obtenons alors les résultats présentés sur la Figure 93.

Étude		Pièce-test-1	
Indice	Module 1	Module 2	Valeur totale
	$\omega_1 = 0.95$	$\omega_2 = 0.05$	
$C(d)^-$	0.055	0.019	0.053
$C(c)^-$	0.596	0.500	0.591
$C(f)_{\max}^-$	0.339	0.000	0.339
$C(f)_{\text{moy}}^-$	0.099	0.000	0.095

Figure 93. Regroupement des valeurs des indices des modules pour calculer les valeurs totales.

3.6. Comparaison des analyses pour la pièce monobloc et pour les modules

La comparaison ne peut pas s'effectuer uniquement à partir des valeurs des indices pour la pièce monobloc et des valeurs totales des indices des modules regroupés. Il est en effet indispensable de pénaliser la conception modulaire pour tenir compte des contraintes liées à l'assemblage des modules, qui peuvent se résumer par les points suivants :

- Des modifications géométriques locales vont être nécessaires afin de réaliser les surfaces de mise et de maintien en position ;
- Des éléments de maintien en position (vis, écrous) vont devoir être utilisés ;
- La qualité de fabrication des surfaces de contact entre les modules ou les éléments d'assemblages doit être soignée pour réaliser des ajustements précis ;
- Une opération manuelle d'assemblage des modules est nécessaire.

D'un autre côté, la fabrication avec un point de vue modulaire présente d'autres avantages dont il convient également de tenir compte. Il s'agit principalement de la possibilité de réaliser les différents modules sur différentes machines, de façon simultanée.

N'étant pas en mesure, à l'heure actuelle, de quantifier ces avantages et inconvénients, nous nous contenterons d'une comparaison directe des valeurs entre monobloc et modulaire. Cette comparaison est réalisée sur la Figure 94, qui reprend la feuille Excel correspondant au résultat de la comparaison créée par la maquette informatique.

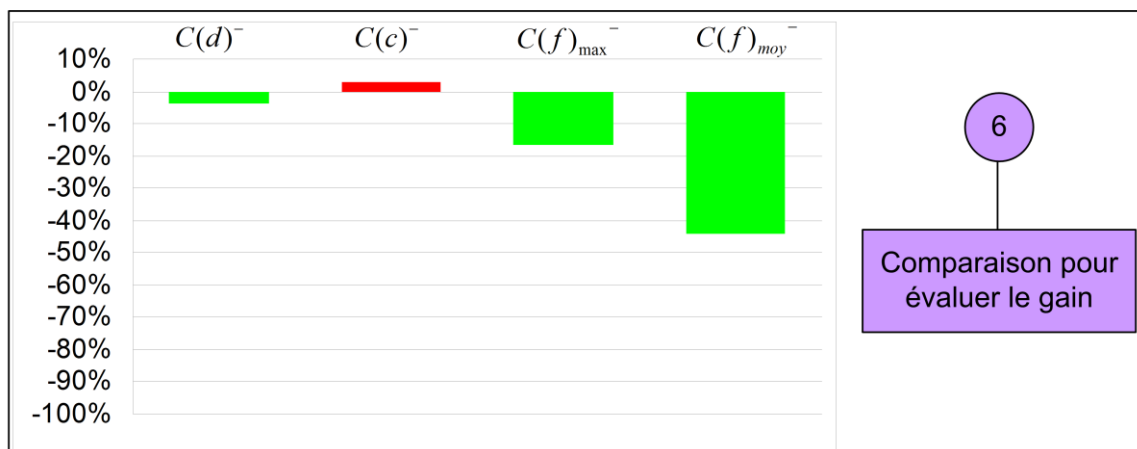


Figure 94. Comparaison des analyses de complexité de fabrication pour le premier exemple.

La baisse pour l'indice $C(d)^-$ (lié aux dimensions maximales) n'est pas réellement significative. De même pour la hausse de l'indice $C(c)^-$ (lié à la quantité de copeaux). Par contre, les fortes diminutions de l'indice $C_i(f)^-$, mises en avant quantitativement par les évolutions des valeurs maximales et des moyennes volumiques et visuellement par l'observation des cartographies prouvent l'apport de l'approche modulaire dans le cas où un seul procédé de fabrication est sélectionné.

On observe effectivement sur les cartographies (Figure 89* et Figure 92*) que les zones les plus complexes à usiner de la pièce monobloc se retrouvent exemptes de difficultés pour ce qui concerne la flexibilité de l'outil de coupe pour une conception de la pièce en deux modules. En outre, la valeur maximale de difficulté de fabrication pour l'indice de flexibilité de l'outil de coupe est raisonnablement diminuée (- 17 %) sans que les autres indices n'en soient véritablement affectés, il en est de même pour la valeur moyenne (- 44 %).

3.7. Synthèse sur ce premier exemple

Ce premier exemple nous permet de conclure en trois points. Premièrement, l'utilisation de la maquette informatique est aisée, elle se base sur la méthodologie en 6 étapes et une modélisation des données par objets permettant un ordonnancement des informations nécessaires à la procédure. Cette maquette, développée comme un module complémentaire d'un logiciel de CAO, permet d'avoir une image quantifiée de la complexité de fabrication d'une conception, pour un procédé donné (ajout ou enlèvement de matière). Deuxièmement, l'analyse de complexité de fabrication d'une pièce monobloc nous fournit une base de réflexion pour appliquer les points de vue modulaire et hybride afin de créer un modèle numérique de la pièce en plusieurs modules. Enfin la maquette informatique permet de disposer d'éléments de comparaison entre la pièce initiale monobloc et l'ensemble des modules regroupés.

Bien sûr, nous n'omettons pas les hypothèses qui ont été prises pour parvenir à ces résultats, notamment en ce qui concerne l'intégration des contraintes d'assemblages imposées par une conception modulaire. C'est pourquoi les évolutions observées dans les valeurs des indices ne peuvent pas être prises en compte si elles sont trop faibles (sans fixer de seuil remarquable), mais les fortes variations traduisent bien une complexité de fabrication différente, en l'occurrence un gain en temps et en coût de réalisation à isoqualité.

Cet exemple était basé sur un procédé par enlèvement de matière, avec un accent particulier sur la complexité de fabrication liée aux paramètres morphologiques qui influencent la flexibilité de l'outil de coupe. D'autres exemples peuvent être mis en avant par une utilisation similaire de la méthode, c'est-à-dire l'amélioration de la complexité de fabrication par une approche modulaire en conservant pour les modules le même procédé de fabrication que celui de la pièce monobloc. À titre d'illustration, nous citons deux exemples. Le premier concerne la réalisation par ajout de matière d'une pièce dont les dimensions sont plus grandes que l'espace de travail de la machine de fabrication rapide. Dans ce cas, une étude basée sur la réduction de l'indice $C(d)^+$ par une approche modulaire permet de disposer en phase de conception d'un outil permettant de faire un découpage raisonné en modules de dimensions compatibles avec les machines disponibles. Le second concerne la réalisation d'une pièce du type bossage cylindrique sur une surface plane (comme celle présentée sur la Figure 95). Suivant les paramètres dimensionnels du plan, le diamètre et la hauteur du bossage cylindrique, une conception en deux modules (le plan d'un côté, le bossage de l'autre) va permettre de réduire la complexité de fabrication, en diminuant sensiblement la quantité de copeaux, c'est-à-dire l'indice $C(c)^-$. Cette morphologie très simple peut se retrouver sous diverses formes dans de nombreuses pièces.

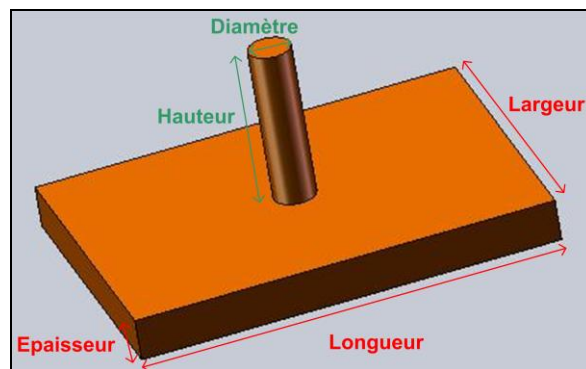


Figure 95. Autre exemple de pièce qui peut illustrer les possibilités de la méthodologie pour une approche modulaire mono-procédé.

4. Deuxième exemple, deuxième pièce-test

4.1. Conception de la nouvelle pièce-test

Ce deuxième exemple s'appuie sur une pièce-test dont la géométrie est globalement similaire à la précédente. La différence se situe au niveau de la poche, dans la partie gauche de la pièce. Pour cette seconde pièce-test, la longueur, la largeur et les rayons de coins de la poche ont été diminués. Nous obtenons alors la pièce dont le modèle numérique compose la Figure 96. Une nouvelle fois, cette pièce est correctement orientée pour tenir compte de l'exigence d'orientation de l'analyse de complexité de fabrication.

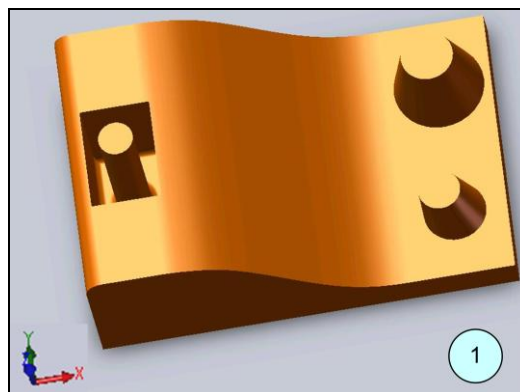


Figure 96. Modèle numérique de la deuxième pièce-test.

4.2. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour cette deuxième pièce-test

La base de données fabrication n'ayant pas évolué par rapport à la première étude, nous réalisons l'analyse de complexité de fabrication par usinage pour cette pièce monobloc. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 97*.

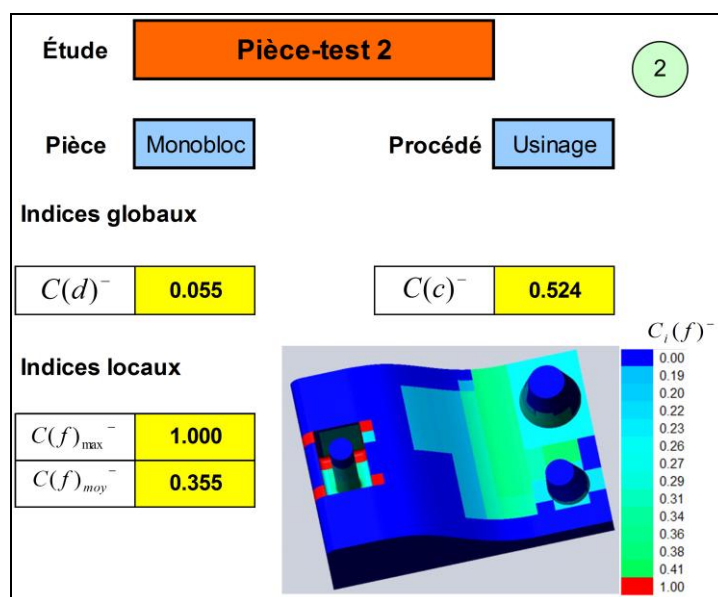


Figure 97*. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour cette seconde pièce-test.

Les indices liés aux dimensions maximales et à la quantité de copeaux ne varient pas énormément par rapport à la première étude (Figure 89*). En revanche, l'indice lié à la flexibilité de l'outil de coupe augmente considérablement dans la zone de la poche située sur la gauche de la pièce. Nous voyons cela d'une part avec la cartographie de distribution des valeurs, pour laquelle l'échelle de couleur balaye l'ensemble des valeurs possibles (de 0 à 1), les zones rouges correspondent donc à des zones extrêmement difficiles, voire impossibles, à usiner. D'autre part, la moyenne volumique des valeurs de cet indice a également amplement augmenté par rapport à la première étude monobloc (plus du double). Il va donc falloir se concentrer sur cette zone spécifique pour, dans un premier temps, appliquer les cheminements de pensée présentés lors de l'étude précédente afin de comprendre ce qui engendre ces valeurs élevées. Nous pourrions alors, dans un second temps, appliquer les points de vue modulaires et hybrides afin de réduire la complexité de fabrication.

4.3. Exploitation des résultats

4.3.1. Deux types d'octants avec une complexité de fabrication élevée

Nous reprenons le cheminement de pensée qui permet de détailler les raisons qui font que la valeur de l'indice $C_i(f)$ est élevée pour les octants situés dans les zones les plus complexes. Nous allons détailler cela pour deux octants représentatifs de l'ensemble, les n°1376 et 5713 dont la position est dévoilée sur la Figure 98. Les informations morphologiques extraites du modèle numérique pour ces octants sont regroupées dans le Tableau 10.

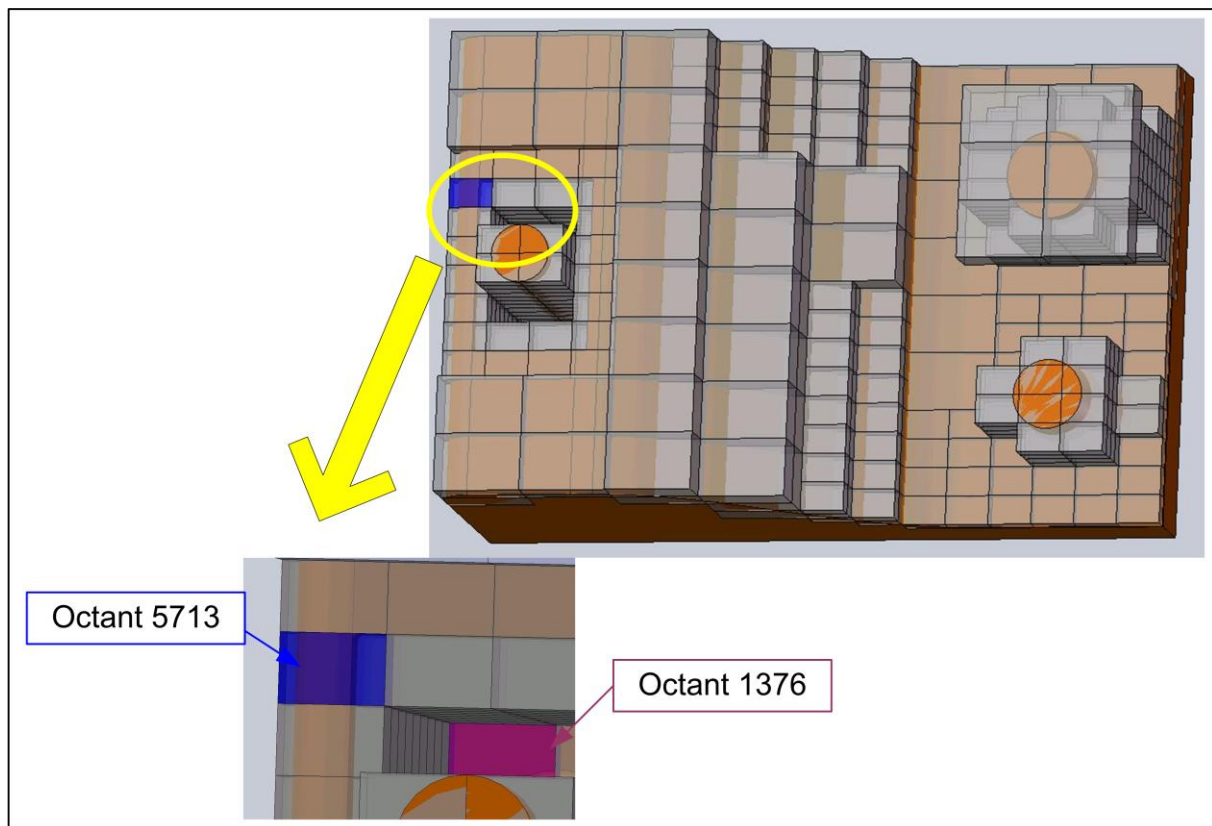


Figure 98. Détail de la décomposition octree de la seconde pièce-test.

N°	Couleur	Voisins directs	Directions d'ouvertures	Voisins indirects	L_{min}	D_{max}	rf	rc	D	L_{seuil}	L	$C(f)^{-}$
1376	Gris	1358,1372, 1375,1378, 1385	Z+	-	40.625	5	-	-	5	22	40.625	0.813
5713	Gris	5357,5711, 5714,5731	X-,Z+	-	12.5	-	-	0.5	1	4	12.5	1

Tableau 10. Extractions des informations morphologiques pour les octants 1376 et 5713.

Pour les octants du même type que 5713 (on parlera pour la suite de cet exemple des octants de type 5713), la valeur très faible de rc_{5713} impose d'utiliser une fraise dont le diamètre est compatible à partir des fiches outils de la classe OUTILS. Pour les octants du même type que 1376 (octants du type 1376), c'est principalement la combinaison de valeur élevée de $L_{min}(1376)$ imposée par la profondeur de la poche et la limite pour $D_{max}(1376)$ liée à la faible distance entre les parois de la poche et l'îlot cylindrique qui conditionne la valeur très importante du rapport $L(1376) / D(1376)$. Ce rapport vaut 8,125 (et 12,5 pour l'octant 5713), ce qui est à la limite des valeurs technico-économiques couramment admissibles pour l'usinage. Il devient donc nécessaire d'engager des mesures correctives pour que la pièce soit fabriquable plus facilement. Ces mesures peuvent prendre plusieurs apparences, expliquées dans les trois alternatives suivantes.

4.3.2. Première alternative : point de vue modulaire

Pour les octants de type 1376, nous pouvons utiliser le même raisonnement que celui utilisé pour créer les modules du premier exemple. Il nous conduit à scinder en deux modules les zones contenant les octants voisins indirects responsables de la valeur de $D_{max}(1376)$, c'est-à-dire qu'il faut séparer l'îlot central cylindrique de la paroi de la poche. Cela nous amène alors à réaliser les deux modules de la Figure 99.

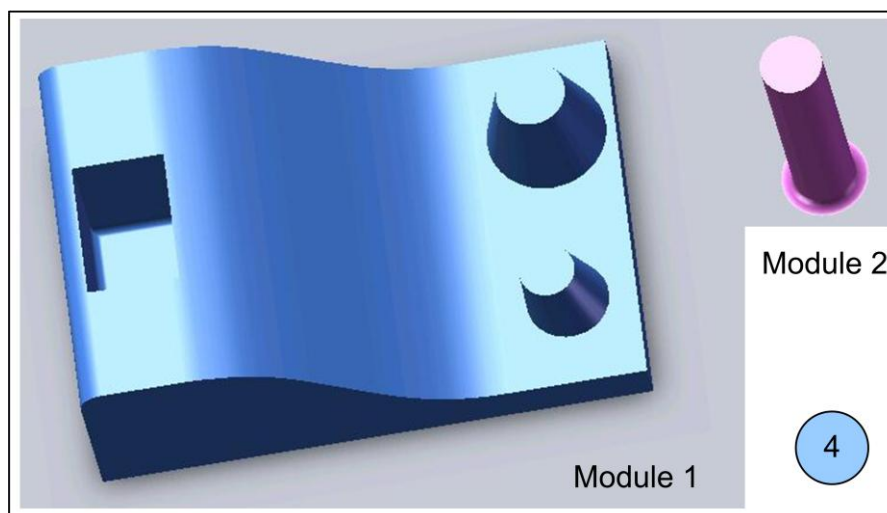


Figure 99. Possibilité de conception modulaire pour réduire la complexité de fabrication par usinage pour la seconde pièce-test.

Bien évidemment, pour réaliser efficacement cette pièce avec une approche modulaire, nous pouvons réutiliser les apports de la première étude et concevoir la pièce en trois modules, comme le suggère la Figure 100.

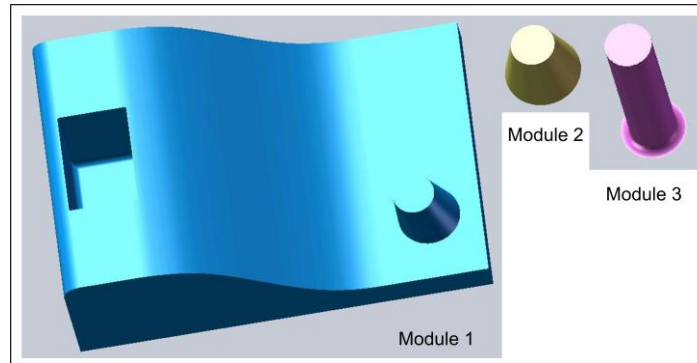


Figure 100. Exemple de conception en trois modules de la seconde pièce-test.

Néanmoins, dans le cadre de ce chapitre dont l'objectif est de présenter les différentes possibilités d'utilisation de la méthodologie de conception et de la maquette informatique associée, nous nous bornerons à utiliser seulement deux modules.

La conception modulaire de la Figure 99 est donc analysée du point de vue de la complexité de fabrication de la même façon que précédemment et les résultats sont fournis sur la Figure 101*.

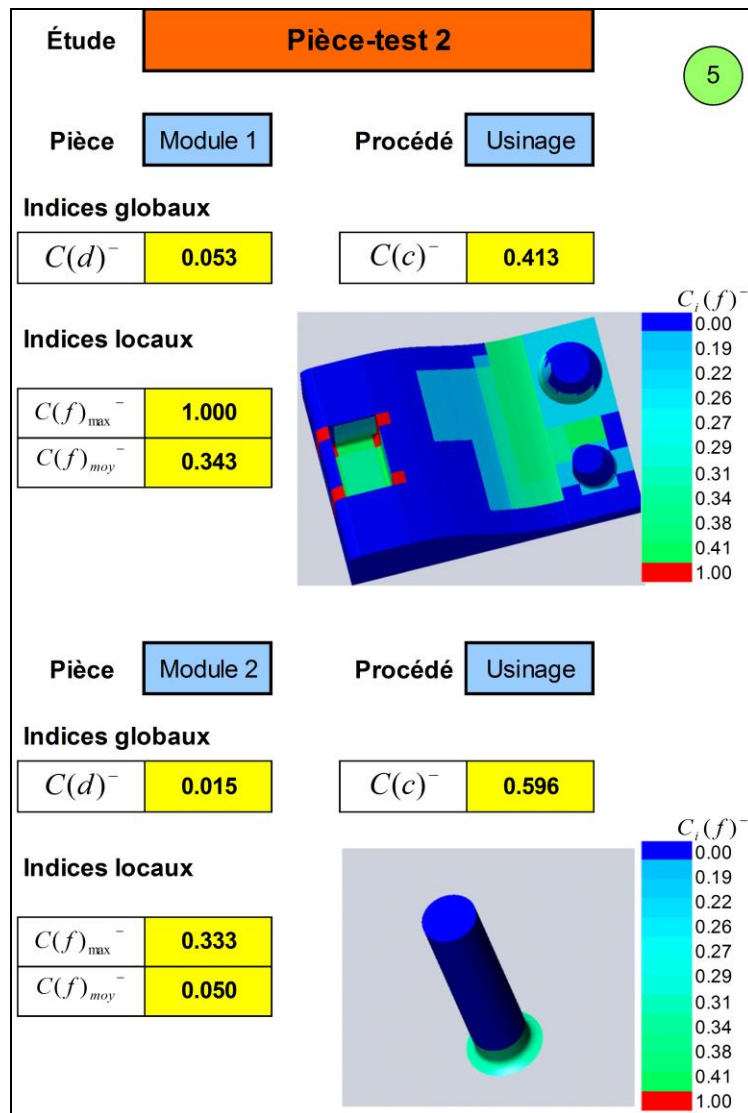


Figure 101*. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la conception modulaire de la seconde pièce-test.

L'analyse des évolutions entre la pièce monobloc et le regroupement des deux modules nous montre que la diminution de la complexité de fabrication est très faible (- 4,5 % pour $C(f)_{moy}$). De plus, l'application du point de vue modulaire n'apporte aucune contribution au niveau des octants du type 5713. Cette approche n'est donc pas suffisante pour réduire efficacement la complexité de fabrication.

4.3.3. Deuxième alternative : modification des paramètres de conception

Pour les octants de type 5713, et par extension tous ceux dont une complexité de fabrication par usinage élevée est due à une faible valeur de rayons de courbure des surfaces concaves contenues dans l'octant (rc ou rf), on peut envisager de modifier ces rayons. La modification des rayons est une décision à prendre au niveau de la conception, en liaison avec les exigences fonctionnelles de la pièce (une valeur si petite est-elle fonctionnellement nécessaire ?). Dans ce cas, la méthodologie proposée entre tout à fait dans un cadre de Design For Manufacturing, puisque des contraintes de réalisation sont incluses dès la phase de conception. Notre méthodologie permet ainsi au concepteur de disposer d'une vision précise des contraintes imposées par la réalisation de la pièce qu'il est en train de concevoir. Notre maquette informatique et les cartographies constituent alors un simulateur de difficultés de fabrication. Nous pouvons tout à fait, dans un contexte industriel d'utilisation de notre méthode d'analyse de complexité de fabrication, ajouter des alarmes si une dimension d'une partie de la pièce engendre une valeur d'indice supérieure à un seuil fixé par avance. Cela alerterait alors le concepteur qui pourrait corriger « en direct » son étude, sans attendre un retour de la part du bureau des méthodes. À titre de comparaison, des rayons de coin de 5 mm au lieu des 0,5 mm de la pièce-test font redescendre la valeur $C(f)_{moy}$ à 0,165 soit une baisse de 46 %.

4.3.4. Troisième alternative : point de vue hybride

Si une modification des rayons n'est pas concevable, il faut se résoudre à changer de procédé de fabrication. Comme le contexte de notre étude est la combinaison de procédés par ajout et enlèvement de matière, nous envisageons alors un procédé de fabrication utilisant une technique additive. Nous envisageons alors de fabriquer la seconde pièce-test par ajout de matière. Nous déterminons alors la complexité de fabrication par ajout de matière pour la pièce monobloc. Les résultats de l'analyse, obtenus grâce à la maquette informatique sont présentés sur la Figure 102*.

Comme évoqué dans le chapitre précédent, les valeurs de $C(v)^+$ et $C(s)^+$ ne peuvent être calculées que dans un cadre de comparaisons entre plusieurs conceptions, c'est pourquoi nous associons, arbitrairement à ce stade de l'étude, la valeur 1 à ces indices. Lors des futurs comparaisons, la valeur 1 sera donnée à l'indice $C(v)^+$ (respectivement $C(s)^+$) correspondant à la pièce ayant le plus grand volume (respectivement la plus grande aire de surfaces extérieures).

L'analyse de complexité de la Figure 102* met en avant que si l'utilisation d'un procédé par ajout de matière permet de s'affranchir des difficultés liées à l'usinage, en revanche de nouvelles difficultés apparaissent. Cela s'observe principalement sur la cartographie de distribution des valeurs liées à la hauteur, les zones rouges correspondant aux zones les plus complexes à réaliser.

Il convient donc de ne pas directement réaliser par ajout de matière une pièce complexe à usiner, mais bien de discerner les zones complexes à usiner, celles complexes à réaliser par ajout de matière, dans le but de combiner astucieusement les procédés par ajout et enlèvement de matière. Ceci justifie une nouvelle fois l'importance de disposer d'une vision locale des difficultés liées à la fabrication, au travers des cartographies de distribution des valeurs des indices locaux.

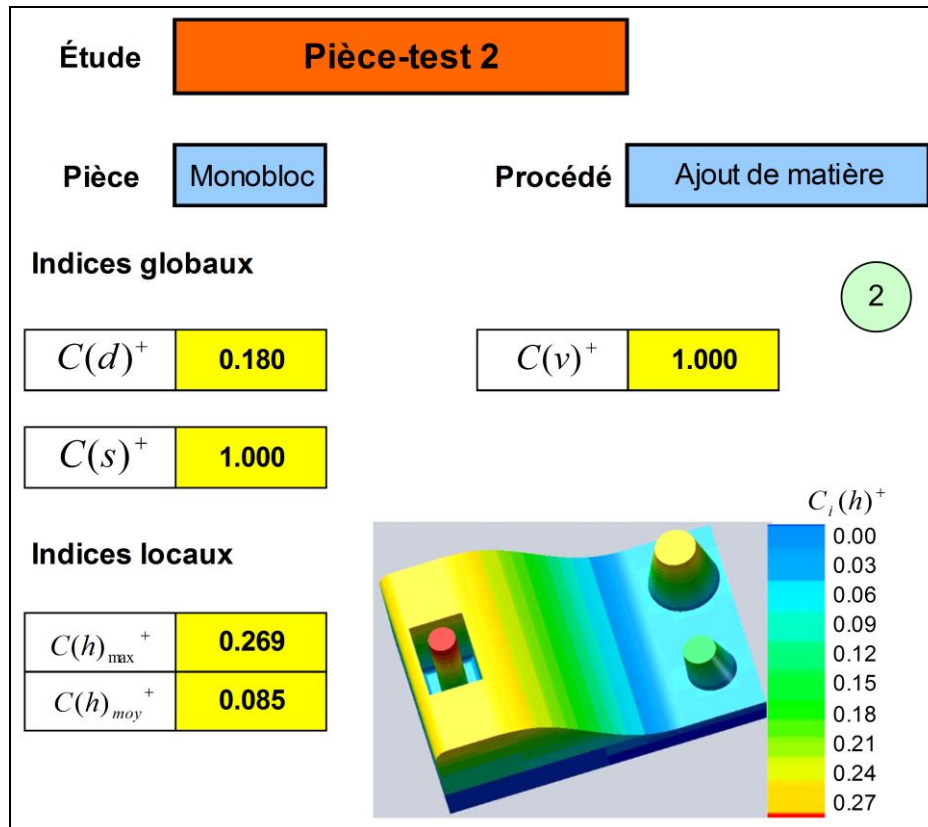


Figure 102*. Analyse de complexité de fabrication par ajout de matière pour la seconde pièce-test.

Dans ces conditions, nous regroupons les zones les plus complexes à usiner au sein d'un module qui sera réalisé par ajout de matière, comme le montre la Figure 103.

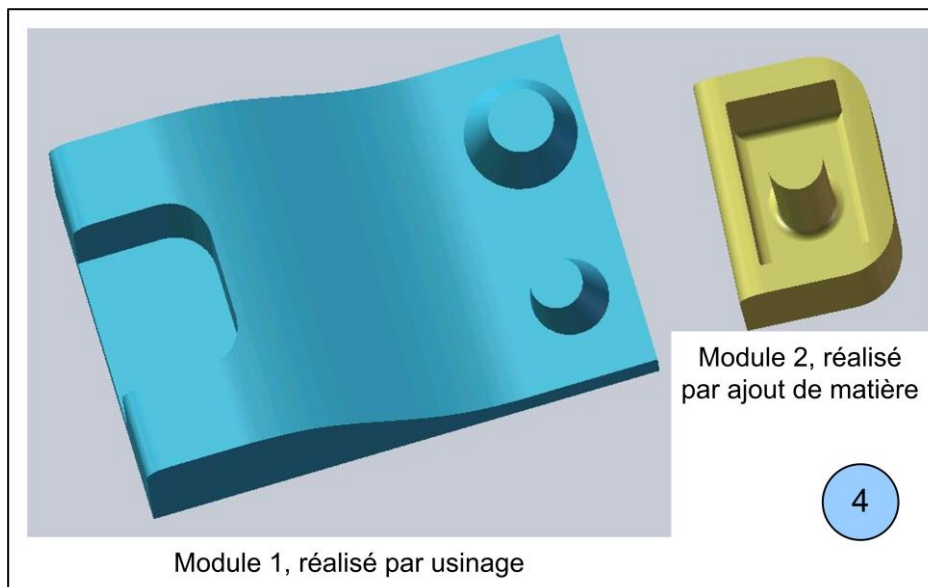


Figure 103. Conception modulaire hybride de la seconde pièce-test.

Ici encore, les contraintes liées à l'assemblage entre les modules ne sont pas directement intégrées dans les modèles CAO des modules. Il faut toutefois préciser que les progrès en cours sur les procédés de fabrication rapide nous permettent d'entrevoir une liaison entre modules usinés et fabriqués par

ajout de matière non plus par assemblage, mais par dépôt de poudre directement sur la base usinée. Le module 1 servira donc de base à la projection de poudre métallique suivant la géométrie définie pour le module 2. Au sein de l'équipe MO2P, J. Kerninon prend en compte ces aspects et son travail de thèse comprend une partie sur la définition de préformes adaptées à un dépôt de poudre [KER08b] [KER09d]. Nous pouvons alors imaginer que la préforme comporte les zones qui sont faciles à usiner et que le dépôt de poudre permet de réaliser par ajout de matière les zones trop complexes à usiner.

4.4. Analyse de complexité de fabrication pour la deuxième pièce-test conçue avec l'approche hybride

La maquette informatique nous permet d'exécuter les analyses de complexité de fabrication par usinage pour le module 1 et par ajout de matière pour le module 2. Les résultats sont présentés sur la Figure 104*.

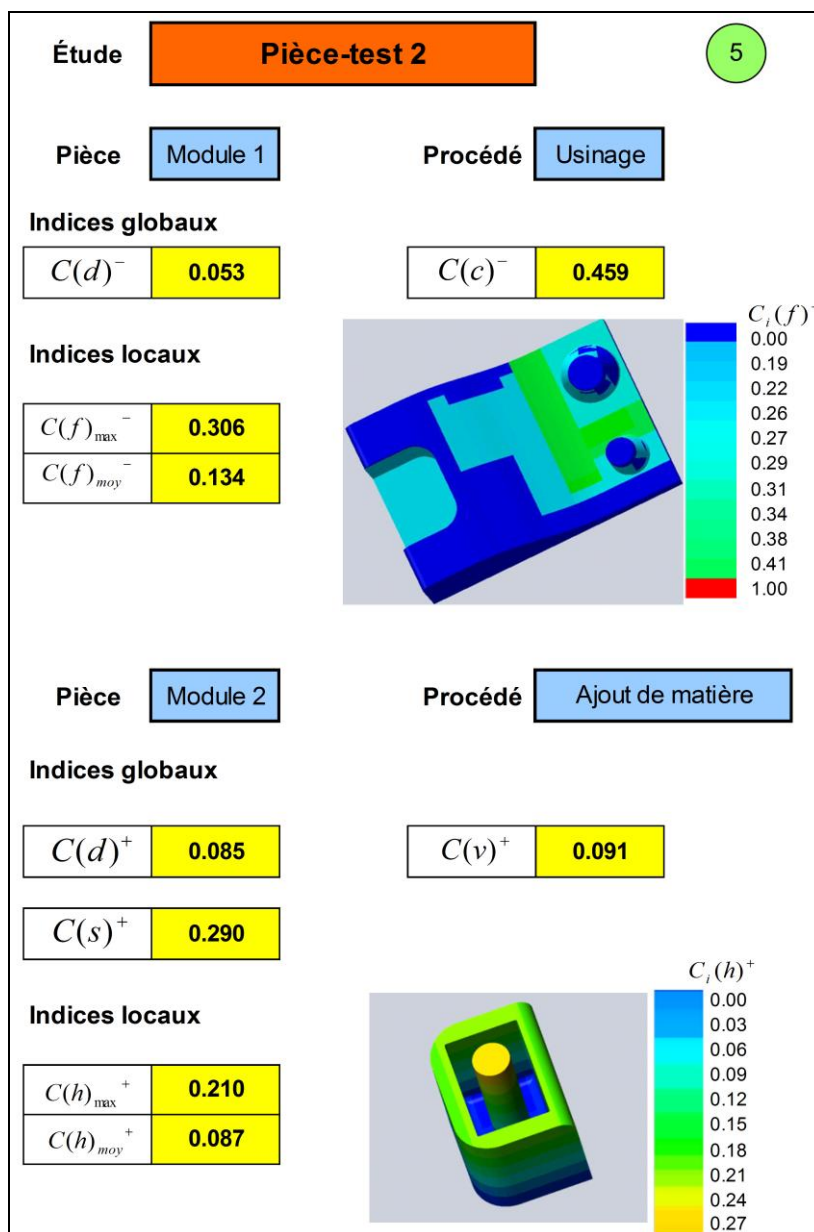


Figure 104*. Analyse de complexité de fabrication pour la seconde pièce-test conçue avec l'approche hybride.

L'opération de regroupement effectuée sur les modules de la première pièce-test ne peut se faire que dans le cas de modules réalisés avec le même procédé. Ici, ce n'est effectivement pas envisageable car les indices ne sont pas du même ordre. Par exemple, le regroupement d'un indice lié à la quantité de copeaux pour un module usiné avec un indice lié à la hauteur pour un module fabriqué par ajout de matière ne présente pas de sens réel. C'est pourquoi nous nous limiterons à des comparaisons d'indices entre la conception monobloc par usinage et le module 1 d'une part, et entre la conception monobloc par ajout de matière et le module 2 d'autre part.

4.5. Comparaison entre la conception monobloc et la conception modulaire hybride

Pour ces comparaisons, nous utilisons de nouveau la procédure informatique pour quantifier l'évolution entre les conceptions monoblocs et les différents modules. L'objectif de cette dernière étape de la méthodologie de conception est de vérifier que l'application du point de vue hybride a permis de concevoir des modules qui réduisent significativement la complexité de fabrication par rapport à une vision monobloc traditionnelle. Les résultats que nous obtenons composent la Figure 105.

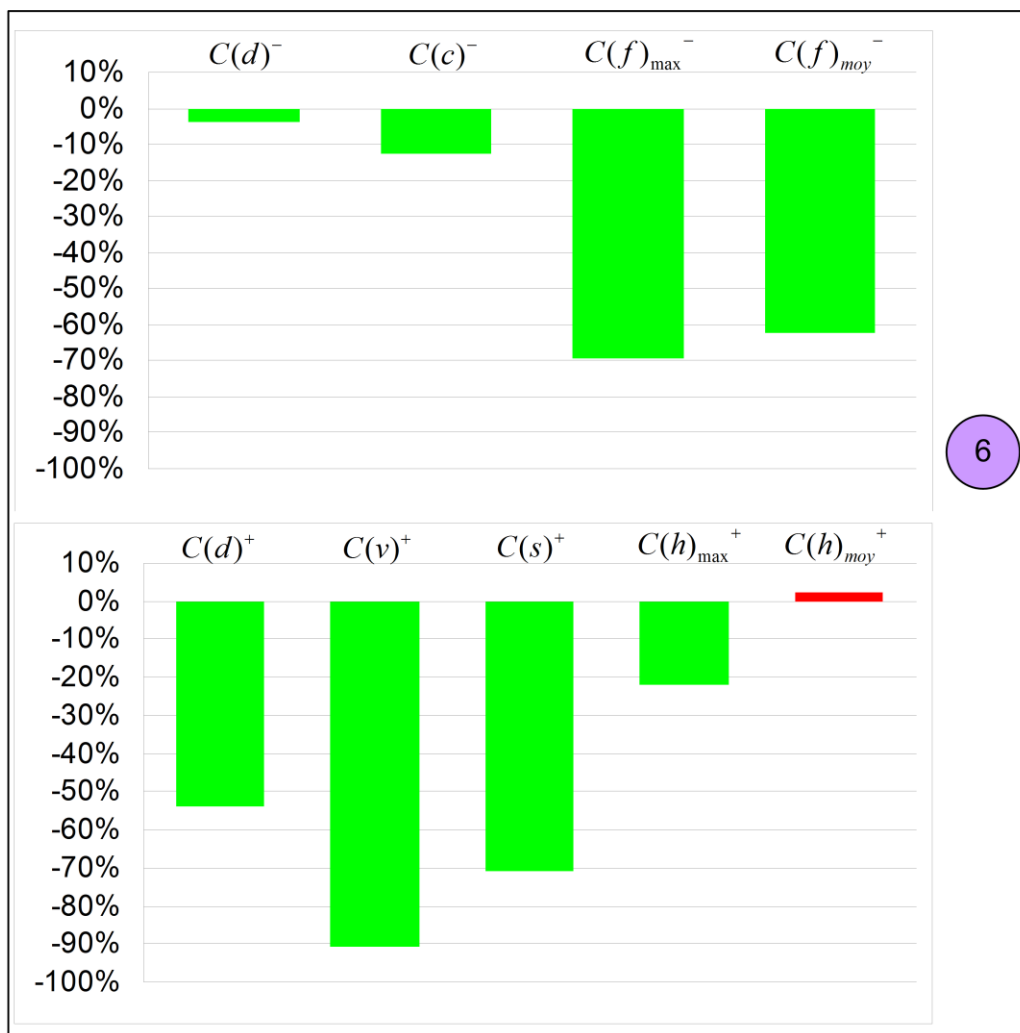


Figure 105. Comparaison entre les analyses de complexité de fabrication pour la pièce-test monobloc et pour les modules.

4.6. Synthèse sur ce deuxième exemple

L'étude de cette seconde pièce-test a permis de mettre en avant d'autres possibilités offertes par la méthodologie et la maquette informatique associée.

L'approche modulaire telle qu'elle a été présentée sur la première pièce-test peut se révéler insuffisante pour réduire significativement la complexité de fabrication, comme c'est le cas au niveau de la poche de cette seconde pièce-test. Dans ce cas, l'utilisation d'un module réalisé par ajout de matière qui regroupe les zones les plus complexes à usiner (mises en avant lors de l'analyse de complexité de fabrication par usinage de la pièce monobloc) devient intéressante. Cela permet d'utiliser adroitement chaque procédé en se cantonnant à fabriquer les différentes zones avec le procédé le plus adapté, c'est-à-dire celui qui ne présente pas de grandes difficultés de fabrication pour la zone considérée.

De plus, le détail des valeurs de certains indices peut permettre une suggestion de reconception dans le but de diminuer la complexité de fabrication. Nous avons montré cela grâce à l'étude de $C_{5713}(f)$, dont la valeur élevée peut être réduite si les paramètres dimensionnels choisis lors de la conception peuvent être modifiés. Nous pouvons aller plus loin dans cette voie, en utilisant la méthodologie et sa maquette informatique associée comme des outils de simulation pour détecter, dès la phase de conception, des incompatibilités entre la pièce conçue et sa future fabrication avec un procédé donné. C'est ce que nous expliquons dans la partie suivante.

5. Troisième exemple : détection d'incompatibilités entre modèle numérique et procédé de fabrication

5.1. Objectif

L'objectif de ce troisième exemple est de montrer une nouvelle possibilité d'utilisation de la méthode de conception. Lors de l'analyse de complexité de fabrication, il se peut que des zones soient révélées comme impossibles à fabriquer avec le procédé déterminé. Dans l'état actuel de la maquette informatique, sont détectables les zones pour lesquelles l'usinage est incompatible avec la pièce conçue pour cause d'inaccessibilité des outils de coupe. Nous allons donc voir dans cette partie comment repérer ce type de zones incompatibles et quelles actions sont suggérées par la méthodologie pour les éviter.

5.2. Arêtes vives incompatibles avec un procédé d'usinage

Nous avons montré la difficulté engendrée par des faibles rayons de coins avec l'exemple de la poche sur la seconde pièce-test, nous aurions même pu aller jusqu'à définir des arêtes vives à cet endroit, ce qui aboutirait à une incompatibilité au niveau du calcul de l'indice local lié à la flexibilité de l'outil de coupe. En effet, aucune fraise de coupe n'autorise ce type de configuration. Il est alors nécessaire que la procédure informatique relève cette incompatibilité.

Ainsi, lors de la recherche des rayons de courbure des surfaces concaves, une arête vive détectée entre deux surfaces dont les directions des normales se croisent (produit scalaire négatif entre les vecteurs directions ou rayon nul) doit renvoyer automatiquement une alerte sur cette partie de la pièce étudiée. C'est pourquoi, dans la configuration proposée sur la Figure 106, la représentation par cartographie des valeurs de l'indice local $C_i(f)$ permet, au fur et à mesure des niveaux de la décomposition octree, de localiser avec de plus en plus de précision quelles sont les zones qui posent problème.

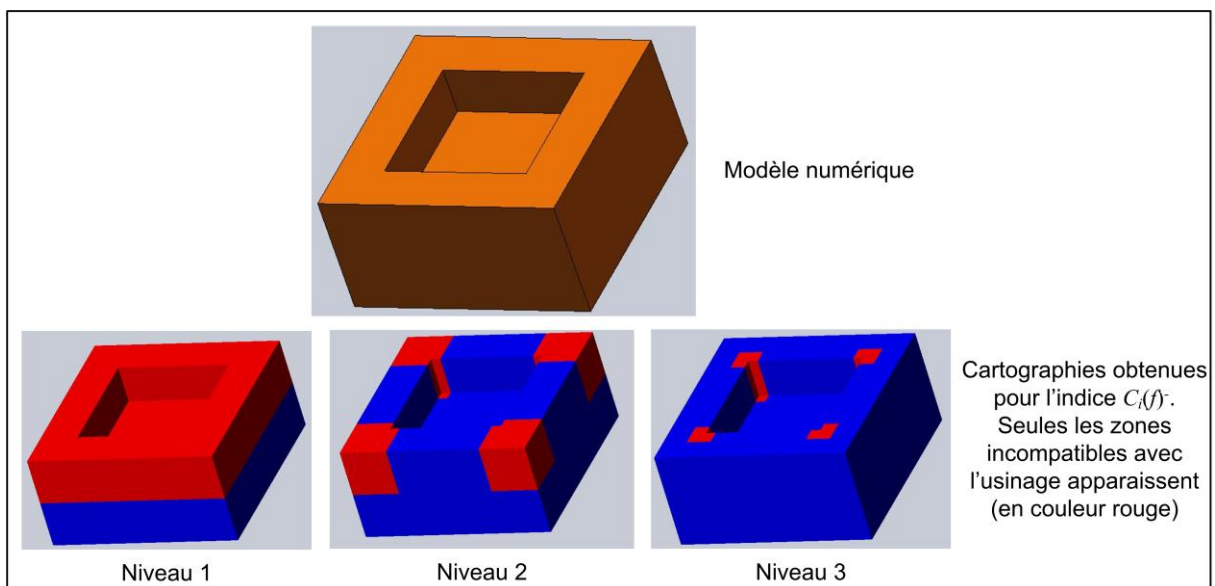


Figure 106. Zones incompatibles (arêtes vives) avec un procédé d'usinage.

Nous pouvons remarquer que toute l'attention du concepteur est attirée sur ces zones problématiques car le reste de la cartographie n'est pas traitée. Tant que subsistent des incompatibilités, la cartographie focalise sur ces zones de façon binaire (rouge ou bleu). La couleur rouge indique que la surface contenue dans l'octant comporte une incompatibilité. Par opposition, la couleur bleue témoigne, sur cette cartographie, d'une compatibilité entre ces parties du modèle numérique et le procédé choisi, sans faire état de la complexité relative des différentes zones. Il n'est en effet pas judicieux de vouloir connaître une répartition de la complexité de fabrication dans certaines zones alors que d'autres ne sont tout simplement pas fabricables pour cause d'inaccessibilité outils.

C'est ensuite au concepteur de la pièce de corriger ce défaut soit en modifiant la morphologie de la zone problématique, soit en utilisant le point de vue hybride pour créer des modules et utiliser les procédés par ajout de matière à bon escient, en complément de l'usinage. La Figure 107 illustre ces choix possibles de correction.

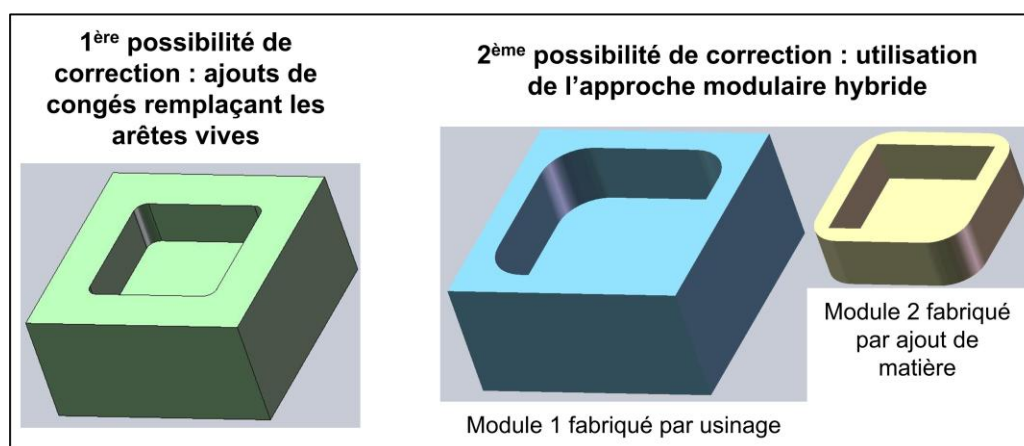


Figure 107. Possibilités de correction pour les zones incompatibles de type arêtes vives.

5.3. Formes intérieures incompatibles avec un procédé d'usinage

La présence d'arêtes vives entre deux surfaces dont les directions des normales se croisent n'est pas la seule incompatibilité avec un procédé d'usinage. En effet, la réalisation de formes intérieures n'est pas toujours possible en usinage. C'est notamment le cas des canaux de refroidissement conformes, très utilisés pour des outillages d'injection lorsque l'on souhaite maîtriser parfaitement le refroidissement de la pièce injectée. Nous avons d'ailleurs déjà évoqué la possibilité de fabriquer ces canaux conformes avec un procédé additif. Ainsi, à partir des directions d'ouvertures des octants, déterminées lors de la phase de calcul de l'indice $C_i(f)$, la maquette informatique est en mesure de détecter une incompatibilité entre les directions d'ouvertures possibles pour un octant et ses voisins indirects qui révèle que les surfaces contenues dans un octant sont inaccessibles pour un outil de coupe. La règle est la suivante : si un octant gris a un voisin indirect et qu'il existe des voisins indirects dans les directions perpendiculaires à ses directions d'ouverture, alors la surface contenue dans l'octant est considérée comme inaccessible. Il est cependant nécessaire de réaliser la décomposition octree jusqu'à des octants suffisamment petits pour que cette incompatibilité apparaisse. Un exemple éclairant la détection de zones incompatibles de types canaux conformes avec un procédé d'usinage est montré sur la Figure 108.

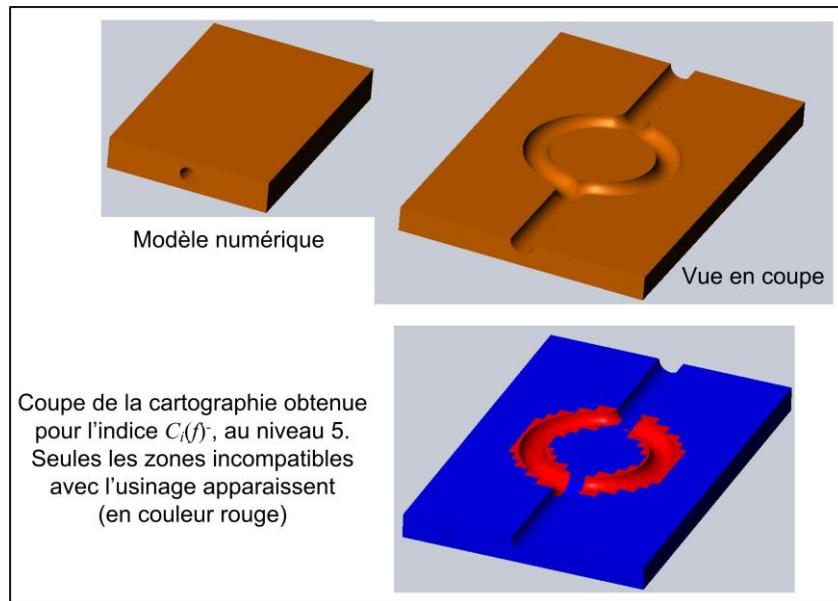


Figure 108. Zones incompatibles (formes intérieures) avec un procédé d'usinage.

À partir de ce constat, les actions à mener peuvent être :

- La réalisation par ajout de matière d'un module contenant la géométrie intérieure complexe (point de vue hybride) ;
- Un découpage approprié en modules permettant d'usiner ces canaux de refroidissement (point de vue modulaire).

Une illustration de ces propositions est présentée sur la Figure 109.

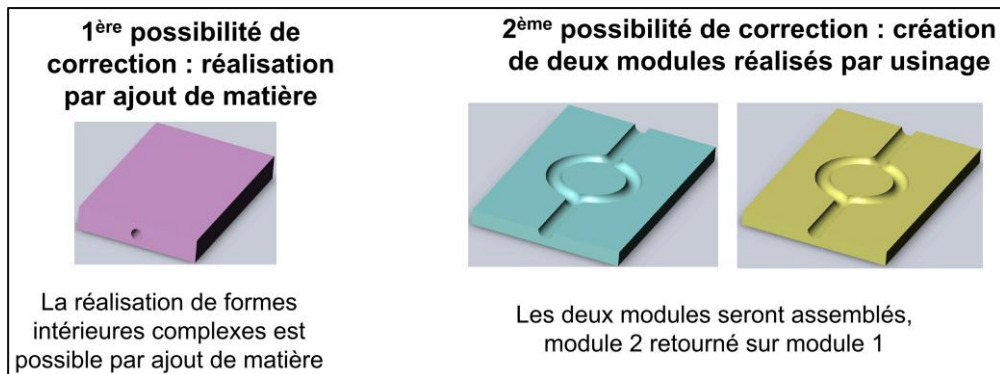


Figure 109. Possibilités de correction pour les zones incompatibles de types formes intérieures.

Cette seconde possibilité a d'ailleurs été utilisée dans un cas très concret de réalisation de pièces intervenant dans la composition d'un missile. L'étude a été réalisée au sein de Bretagne UGV, groupement d'intérêt scientifique sur les thématiques liées à l'usinage grande vitesse hébergé dans les locaux de l'ENS Cachan – Antenne de Bretagne. Pour cause de confidentialité, nous ne pouvons pas reproduire ici de figures de cette étude. La pièce comporte un refroidisseur intérieur, dont les formes s'apparentent à celles de la Figure 108, donc incompatibles avec un procédé d'usinage. C'est pourquoi la fabrication de cette pièce est effectuée en intégrant un point de vue modulaire. Un premier module correspond à la partie inférieure de la pièce, il ne pose pas de réelles difficultés d'usinage. Un second module correspond à la partie supérieure de la pièce, il ne présente pas non plus de zones incompatibles avec un procédé d'usinage. Les deux modules sont ensuite assemblés par brasage, en déposant un cordon de métal tout autour de l'ensemble.

6. Pour aller un peu plus loin...

6.1. Limites des possibilités de la méthodologie

Ces différents essais sur des pièces-test permettent de mettre en évidence les possibilités d'utilisation de la méthodologie et de son développement informatique au sein d'un logiciel de CAO. Ils révèlent également les verrous qu'ils restent à lever afin de disposer d'une maquette entièrement automatisée ainsi que les limites liées à la comparaison des indices.

6.2. Perspectives d'améliorations

6.2.1. Création des modèles numériques des modules

Cette étape de conception des modules reste, en l'état actuel de la maquette informatique, une étape manuelle. À partir des résultats de l'analyse de complexité de fabrication pour la pièce monobloc, c'est-à-dire les valeurs des indices globaux et les cartographies de distribution des valeurs des indices locaux, l'utilisateur se base sur les cheminements d'exploitation des indices présentés dans ce chapitre afin de créer les modèles numériques des modules. Nous n'avons, en effet, pas encore développé de procédure informatique liée à cette étape pour deux raisons principales.

Premièrement, la difficulté inhérente à l'automatisation de règles de conception rend extrêmement délicate son implémentation dans un logiciel de CAO. Il faudrait être en mesure de prendre en compte la création automatique de surfaces d'assemblages et toutes les modifications que cela implique au niveau des pièces. Nous avons préféré mettre l'accent sur le développement de la méthodologie en tant qu'outil utilisable en phase de conception, plutôt que sur la création automatique des modules.

Secondement, nous avons évoqué, lors du chapitre introductif, l'importance grandissante de l'objectif d'adaptabilité (de flexibilité) dans le développement d'un produit, et l'avantage que procure le point de vue modulaire pour répondre à cet objectif, en regroupant en modules les zones amenées à évoluer lors du cycle de vie du produit. Notre méthodologie étant basée sur la complexité de fabrication (donc par extension sur les objectifs coût – qualité – délai), nous ne tenons pas compte de cet aspect flexibilité rendu possible par l'utilisation de modules. Ainsi pour définir efficacement les modules, il serait pertinent d'intégrer notre approche modulaire basée sur la complexité de fabrication avec une approche modulaire basée sur l'adaptabilité aux différentes variantes de produits. Les travaux précédemment réalisés par notre équipe de recherche concernant le développement du concept MCP peuvent nous aider en ce sens [LES05] [GIL06] [RIV07b].

6.2.2. Comparaison des indices

En ce qui concerne la comparaison des indices, nous sommes limités par le fait que nous ne pouvons comparer que des indices de même nature. Nous ne sommes effectivement pas encore en mesure de réaliser des comparaisons entre les valeurs des indices pour l'usinage et pour l'ajout de matière.

Il serait pour cela nécessaire de pouvoir regrouper les indices liés à un module réalisé par usinage et les indices liés à un module fabriqué par ajout de matière afin de pouvoir quantifier l'évolution par rapport aux indices de la pièce monobloc. Ceci ne sera pas possible tant que les indices ne sont pas de même nature.

7. Points forts de la méthodologie

Grâce aux exemples exposés dans ce chapitre, les possibilités d'utilisation de la méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides et de la maquette informatique associée sont mises en avant. Les points forts de la méthode développée sont repris un à un dans les paragraphes suivants.

7.1. Utilisation en phase de conception

La procédure fonctionne à partir de modèles volumiques de pièces, sous le logiciel de CAO SolidWorks. Hormis quelques renseignements indispensables (comme la liste des machines ou des outils disponibles), seules sont nécessaires des données déterminées dans la phase de conception. Pour les indices utilisés dans ce chapitre, il s'agit du modèle numérique de la pièce, mais nous avons vu que d'autres indices ($C_i(m)$ lié au matériau, $C_i(r)$ lié à la spécificité d'état de surface) faisaient appel à des caractéristiques de la pièce également définies lors de la phase de conception. Le concepteur peut donc se servir de la maquette informatique, dans une démarche de DFM, sans connaissances spécifiques sur les procédés de fabrication.

7.2. Détermination de la complexité de fabrication

Le calcul des indices globaux ainsi que des valeurs maximales et moyennes des indices locaux donnent une estimation quantitative de la complexité de fabrication par usinage ou par ajout de matière. Bien évidemment, cette estimation est dépendante des indices définis et effectivement implémentés dans la maquette informatique, mais nous avons vu que d'autres indices peuvent être créés et ajoutés facilement à la maquette informatique.

Nous pouvons aussi remarquer la facilité de lecture des résultats, fournis sous forme de feuilles Excel par la procédure informatique.

7.3. Connaissance des zones les plus complexes à fabriquer

La cartographie de distribution des valeurs des indices locaux fournit une vision précise des zones les plus complexes à fabriquer au regard de l'indice choisi. L'échelle de couleurs est, par défaut, construite de façon automatique, en associant la couleur bleue aux zones les plus simples (plus faible valeur de l'indice) et la couleur rouge pour les plus complexes (plus forte valeur de l'indice). Mais, pour comparer plus aisément plusieurs conceptions, l'échelle de couleur peut être personnalisée afin de reprendre l'étendue des valeurs d'une précédente conception. C'est d'ailleurs avec une échelle personnalisée que nous avons réalisé les analyses de complexité de fabrication des conceptions modulaires et hybrides des pièces-test.

Ces cartographies, associées aux valeurs globales, permettent de tenir compte de la nécessaire double vision, locale et globale, lorsque l'on souhaite étudier les contraintes liées à la fabrication d'une pièce.

7.4. Recommandation pour diminuer la complexité de fabrication

À partir des indices globaux et des cartographies, nous avons décrit le cheminement de pensée qui va permettre de potentiellement réduire la complexité de fabrication. Le raisonnement est notamment basé sur l'étude des valeurs des indices locaux dans les zones les plus complexes, mises en avant par les cartographies. Cette méthode de raisonnement permet de fournir des indications sur les actions à entreprendre pour modifier la conception de la pièce. Les actions envisagées sont au nombre de trois. Il peut s'agir d'une modification de valeurs dimensionnelles pour certaines géométries. Cela ne peut être possible que si le cahier des charges de définition de la pièce l'autorise. Dans certains cas, en optant pour une conception par modules et en conservant le même procédé de fabrication, la complexité de fabrication peut significativement diminuer. C'est ce qui a été mis en évidence avec le premier exemple. Enfin, d'autres configurations mettent en avant la nécessité de passer à un procédé différent pour réaliser un ensemble de formes jugées trop complexes pour le procédé initial. Ainsi, nous utilisons un procédé additif pour une zone de la pièce-test 2.

7.5. Détection des incompatibilités entre modèle numérique et procédé de fabrication

Pour finir cette liste de points forts, la maquette informatique associée à la méthodologie a également l'avantage de détecter certaines incompatibilités entre le modèle numérique étudié et le procédé de fabrication choisi. Avec la liste d'indices actuellement définis, il s'agit d'alerter l'attention du concepteur sur les zones qui sont impossibles à usiner car inaccessibles pour un outil de coupe. Cela concerne les arêtes vives entre deux surfaces dont les normales se croisent et les formes intérieures non accessibles (comme les canaux de refroidissement conformes d'outillages d'injection). Cet avantage permet indéniablement de gagner du temps lors des phases de développement de produits en évitant des allers-retours entre le bureau d'études et le bureau des méthodes, puisque le concepteur peut modifier directement son modèle numérique en cas de détection d'une incompatibilité avec le procédé de fabrication choisi.

Chapitre 5

Applications industrielles

Afin de valider sur des cas concrets l'utilisation de notre méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides, nous avons travaillé sur des outillages industriels. Nous avons ainsi étudié trois outillages, fournis par nos partenaires, Afoplast et PSA Peugeot-Citroën. Le premier outillage est un noyau d'un moule pour la fonderie de précision, les deux autres correspondent à des outils d'emboutissage de l'industrie automobile. Il s'agit donc d'outillages très différents, que ce soit au niveau des matériaux, des géométries, des dimensions, et qui ont été conçus et fabriqués avec des méthodes et des moyens différents.

Dans la première partie, nous étudierons le noyau créé par la société Afoplast. Il s'agit d'un noyau conçu en deux modules que nous avons déjà utilisé pour illustrer l'approche modulaire. Nous verrons alors que le choix du découpage en modules réalisé intuitivement par l'entreprise peut reposer sur des analyses quantifiées de complexité de fabrication grâce à notre méthode.

La deuxième partie traitera des deux outillages PSA. Ces études se déroulent dans le cadre du projet EMOA (Excellence dans la Maîtrise de l'Ouvrant Automobile) que nous présenterons. Nous développerons alors les analyses de complexité de fabrication de ces outillages, avant d'exploiter les approches modulaires et hybrides de notre méthodologie pour concevoir ces outillages, réduisant ainsi la complexité de fabrication.

Enfin, la troisième partie fera une synthèse de ces études.

1. Étude de l'outillage Afoplast

1.1. Présentation de la société

Afoplast est une PME de 11 personnes, basée en Ile-et-Vilaine. Elle s'est spécialisée dans la fabrication de moules, principalement pour la fonderie de précision cire perdue (notamment pour des applications médicales) et pour l'injection plastique. Les procédés de fabrication utilisés sont l'usinage et l'électroérosion, la société a notamment fait l'acquisition récente d'une machine d'usinage grande vitesse 5 axes.

Dans une société de cette envergure, il est évident que la plupart des décisions concernant la fabrication d'un outillage sont discutées entre un nombre restreint de personnes et qu'elles reposent beaucoup (voire entièrement) sur l'expérience de ces personnes. Il est intéressant de noter que certains moules sont découpés en plusieurs modules afin d'être usinés plus facilement, c'est-à-dire avec une durée de fabrication plus faible pour une qualité égale. Ces découpages, réalisés de manière intuitive par l'entreprise pourraient néanmoins reposer sur une méthodologie de conception élaborée. C'est pourquoi nous avons souhaité analyser par notre approche une partie d'un moule, réalisée en deux modules séparément puis assemblés par la suite, avec notre méthode de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'analyse de complexité de fabrication.

1.2. Présentation de la pièce étudiée

Il s'agit d'un noyau pour un moule de fonderie cire perdue, réalisé en alliage d'aluminium, présenté sur la Figure 110.

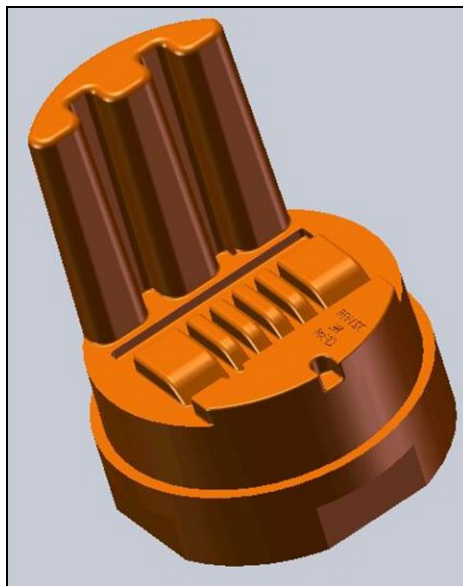


Figure 110. Noyau pour moule de fonderie cire perdue.

Pour préciser le contexte d'utilisation de ce noyau, nous avons représenté sur la Figure 111 la pièce à réaliser par fonderie, en précisant la valeur d'un diamètre pour témoigner de l'encombrement général de la pièce. Sur cette figure les formes réalisées par ce noyau sont également indiquées. La Figure 112 illustre, quant à elle, la modélisation numérique complète du moule, le noyau étant par contre caché.

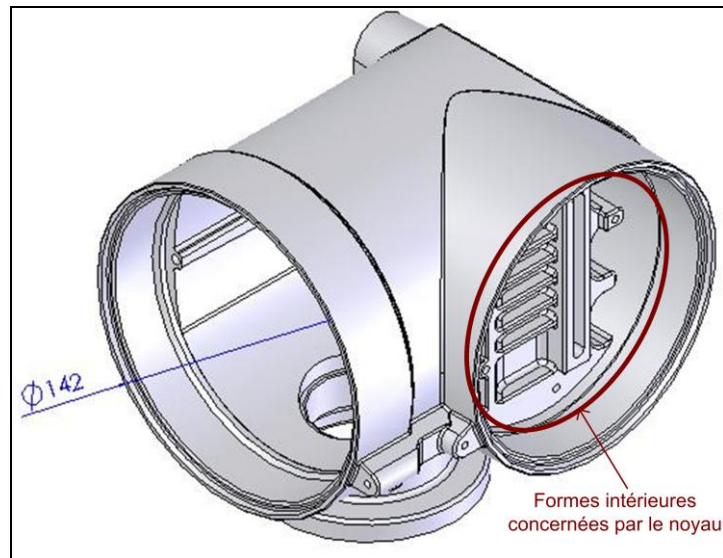


Figure 111. Pièce à réaliser par fonderie.

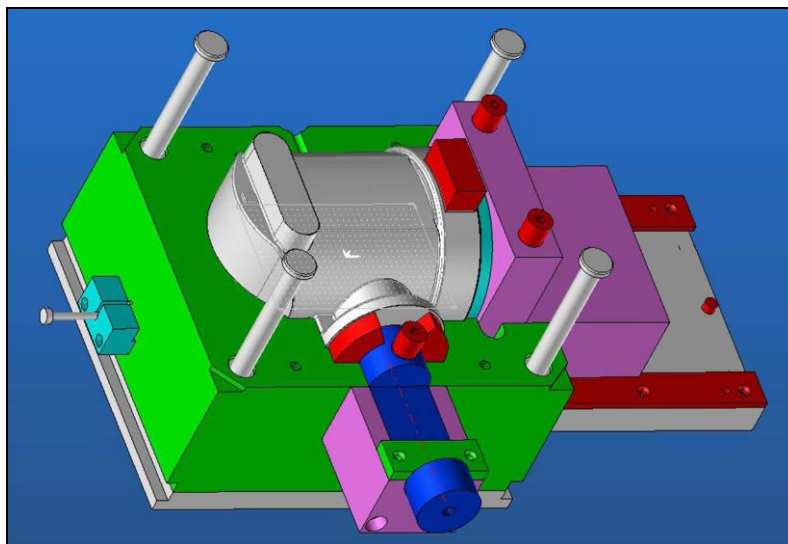


Figure 112. Moule complet.

Cependant, nous n'allons pas travailler exactement avec ce noyau. En effet, nous allons en modifier le modèle numérique afin d'utiliser plus efficacement la méthodologie et la maquette informatique associée. Premièrement, nous supprimons de la pièce une partie de la zone inférieure, qui correspond à des formes réalisées par tournage, car notre approche ne permettra pas d'améliorer ce type de géométrie. Deuxièmement, nous supprimons la gravure sur la partie plane de la pièce. Cette gravure est réalisée à la fin du process de fabrication et sert à marquer les pièces coulées dans le moule. Pour notre application, nous ne souhaitons pas nous concentrer sur cette partie. Nous remarquons toutefois que ce type de marquage peut avantageusement être réalisé au sein d'un module séparé afin de pouvoir modifier simplement le marquage. L'étude d'une conception modulaire d'un outillage tenant compte d'un marquage qui peut être évolutif a été notamment réalisée dans la thèse de M. Rivette [RIV07b], mais ce n'est pas le cœur de notre travail ici. Enfin, en troisième lieu, nous modifions légèrement la pièce (ajout d'une encoche cylindrique) pour qu'elle soit symétrique, ce qui permet d'alléger les calculs de la procédure informatique. Nous obtenons ainsi le modèle CAO de la Figure 113, qui compose ainsi la première étape de notre méthodologie.

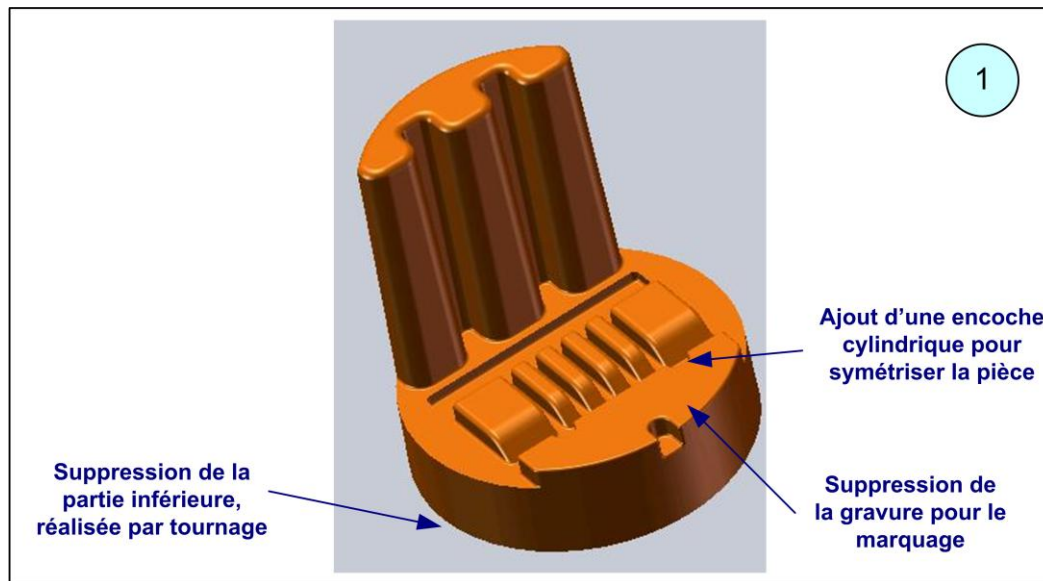


Figure 113. Modèle numérique de la pièce Afoplast étudiée.

1.3. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la pièce monobloc

La deuxième étape de la méthodologie consiste à analyser la complexité de fabrication pour cette pièce monobloc. Les résultats sont présentés sur la Figure 114*.

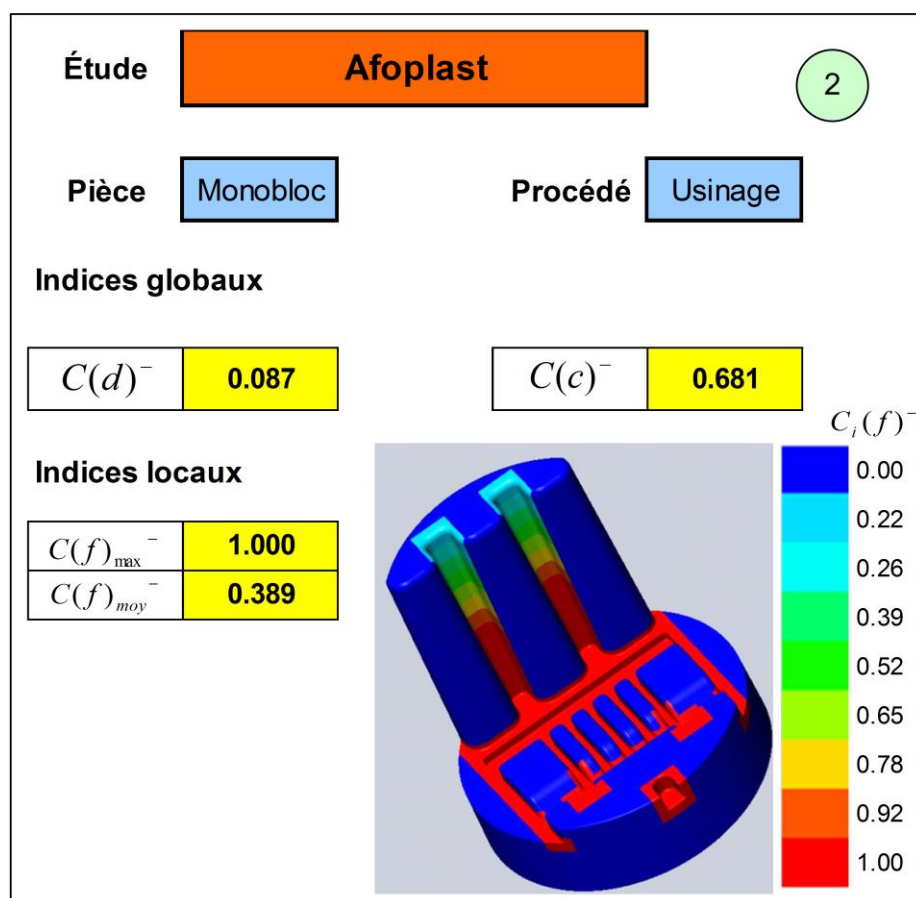


Figure 114*. Analyse de complexité de fabrication de la pièce Afoplast monobloc.

Pour cette analyse, nous avons conservé des fiches machines et outils identiques à celles présentées dans le chapitre précédent. Le brut de la pièce est le cylindre englobant minimal.

La cartographie de distribution des valeurs de l'indice local est réalisée à partir d'une décomposition octree d'un niveau maximal de 4, ce qui correspond à des dimensions des octants les plus petits de 8,125 mm x 8,125 mm x 7,813 mm. Ce niveau est suffisant pour la décomposition car nous observons sur la cartographie l'ensemble des zones les plus complexes à réaliser (valeur maximale de 1) et un niveau supérieur de décomposition n'apporterait sans doute pas une vision plus précise de la répartition de la complexité pour cette pièce.

1.4. Exploitation des résultats et point de vue modulaire

La valeur de $C(d)$ (indice global lié aux dimensions maximales) est de 0,087. Cette valeur faible s'explique par les dimensions de la pièce qui sont globalement petites et qui autorisent l'utilisation de la machine-outil avec le plus faible indice de coût relatif. Donc nous n'allons pas chercher à diminuer encore cette valeur.

La valeur de $C(c)$ (indice global lié à la quantité de copeaux) est, par contre, relativement élevée, sa valeur est de 0,681. Cela est dû à la grande quantité de copeaux générés lors de l'usinage de cette pièce. Il pourra donc être intéressant d'utiliser une approche modulaire pour chercher à réduire cette valeur.

En ce qui concerne l'indice local lié à la flexibilité de l'outil de coupe, nous constatons que sa valeur maximale est atteinte, et la cartographie révèle que c'est le cas en de nombreuses zones. Il va donc falloir détailler le calcul pour les octants ayant la valeur 1. L'analyse est la même pour tous ces octants et met en cause le facteur L_{min} , imposé par l'altitude élevée de la zone la plus haute de la pièce, qui augmente considérablement la valeur de $C_i(f)$ de ces octants.

Nous allons donc, chercher à réaliser la pièce en plusieurs modules, en conservant le procédé d'usinage. Ainsi, la conception modulaire de la pièce est présentée sur la Figure 115, avec la particularité que cette conception en deux modules nous autorise à envisager l'usinage du module 2 avec une orientation particulière qui est précisée sur la droite de la figure. Nous ne tenons pas compte des contraintes d'assemblage pour cette étude. Ainsi la liaison entre les deux modules est composée simplement par le contact entre deux surfaces planes au niveau de l'interface, représenté en rouge sur la Figure 115

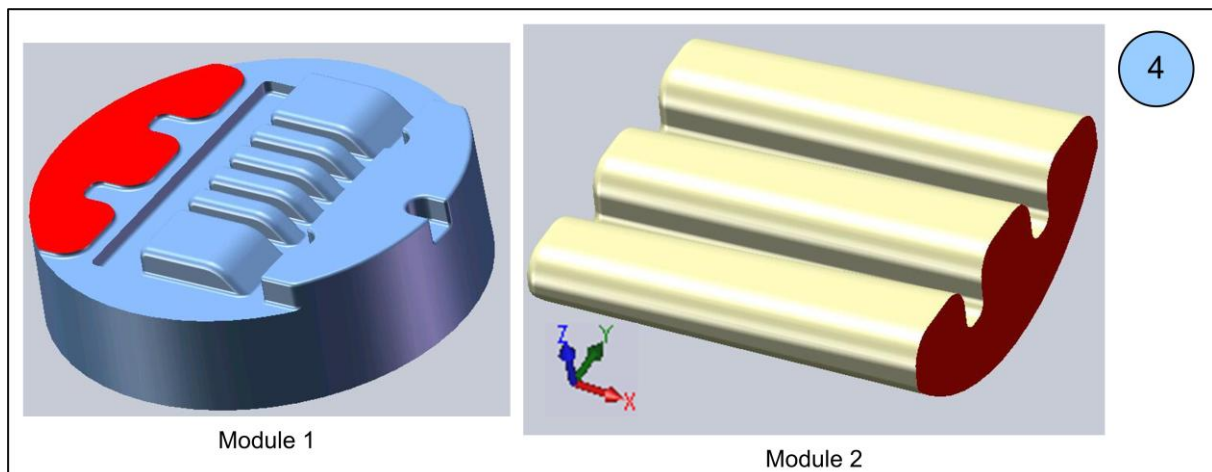


Figure 115. Conception modulaire de la pièce Afoplast.

1.5. Analyse de complexité de fabrication pour les modules

La cinquième étape de la méthodologie consiste à réaliser les analyses de complexité de fabrication par usinage de chacun des modules, puis à regrouper les valeurs pour en faciliter la comparaison. Les résultats des analyses obtenues grâce à la maquette informatique sont fournis sur la Figure 116*. Le Tableau 11 présente les résultats du regroupement des modules.

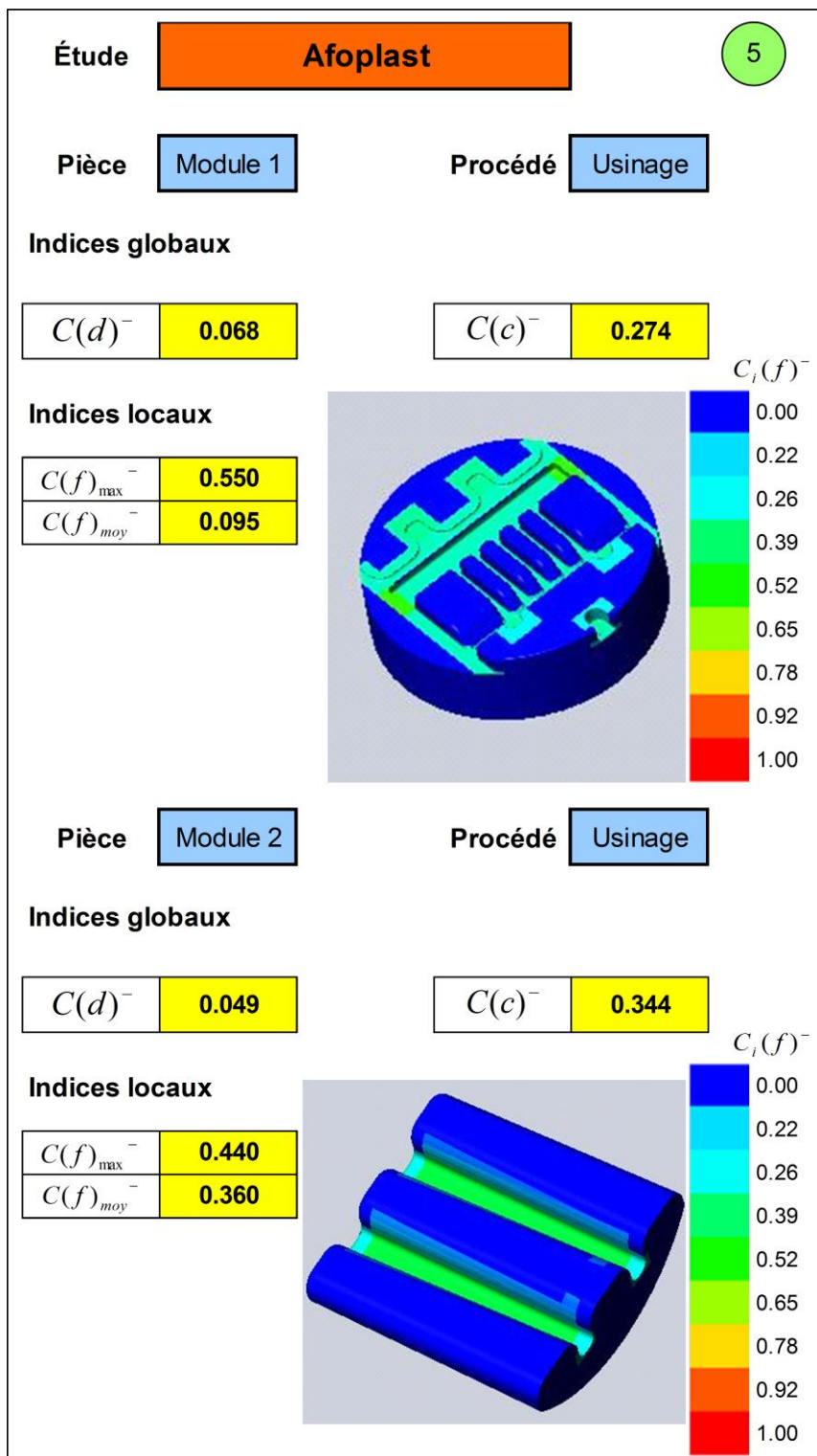


Figure 116*. Analyse de complexité de fabrication pour la pièce Afoplast modulaire.

Étude		Afoplast	
Indice	Module 1	Module 2	Valeur totale
	$\omega_1 = 0.67$	$\omega_2 = 0.33$	
$C(d)^-$	0.068	0.049	0.062
$C(c)^-$	0.274	0.344	0.297
$C(f)_{\max}^-$	0.550	0.440	0.550
$C(f)_{\text{moy}}^-$	0.095	0.360	0.182

Tableau 11. Regroupement des modules pour la pièce Afoplast modulaire.

Les cartographies de la figure précédente, associées à ce tableau, composent l'analyse de la complexité de fabrication de la pièce Afoplast conçue avec le point de vue modulaire. Cette analyse est désormais à mettre en regard avec celle de la pièce monobloc.

1.6. Comparaison des conceptions monobloc et modulaire

Pour réaliser la comparaison entre les deux études précédentes, nous utilisons une nouvelle fois notre maquette informatique, qui nous fournit les résultats de la Figure 117.

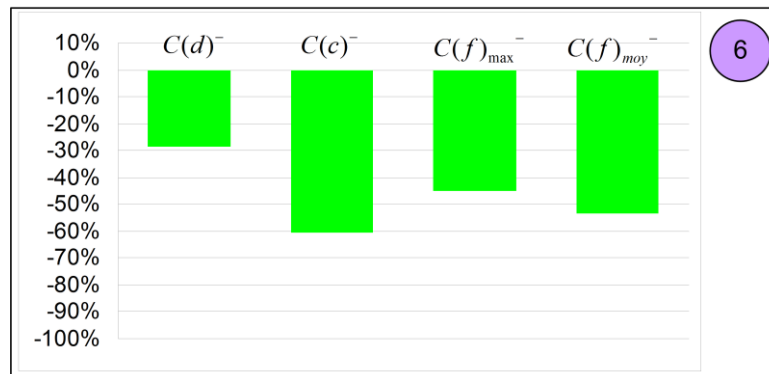


Figure 117. Comparaison entre les deux analyses pour la pièce Afoplast.

Cette figure nous permet de quantifier les évolutions apportées par la conception modulaire par rapport à la conception monobloc traditionnelle. De plus, les cartographies témoignent également de la réduction significative de la complexité de fabrication dans les zones initialement les plus complexes. La conception de la pièce en deux modules permet de diminuer considérablement la quantité de copeaux (baisse de 60 % de l'indice $C(c)^-$). En outre, la possibilité de réalisation de l'un des modules dans une orientation différente permet de réduire sensiblement les difficultés liées à l'utilisation d'outils de coupe moins rigides (baisse de 45 % de $C(f)_{\max}^-$ et de 53 % de $C(f)_{\text{moy}}^-$). Comme nous avons pris un certain nombre d'hypothèses pour ces études, il est nécessaire que les écarts calculés pendant la phase de comparaison soient assez importants pour pouvoir conclure quant à un gain amené par l'approche modulaire. Ici, nous considérons que les diminutions observées sont suffisantes pour estimer que la conception modulaire permettra de réaliser la pièce avec un délai plus court en respectant la même qualité. C'est d'ailleurs une solution qui a été utilisée par l'entreprise Afoplast pour produire cette pièce.

1.7. Lien avec la solution intuitive existante

La pièce Afoplast initiale a été effectivement produite en tenant compte du point de vue modulaire. Cela a été effectué au sein de l'entreprise, de manière intuitive. L'objectif était de limiter l'emploi d'outils longs et de faibles diamètres, sans avoir recours à une solution électroérosion. Il a donc été décidé de réaliser cette pièce en deux modules, qui sont présentés sur la Figure 118.

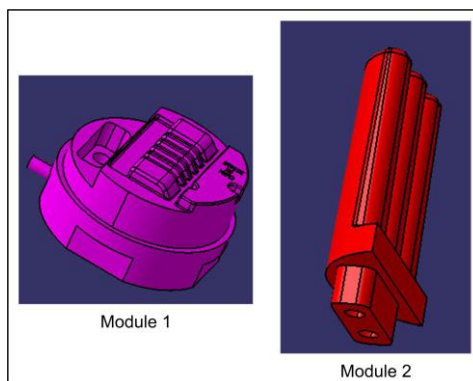


Figure 118. Conception des deux modules réalisée par Afoplast.

Bien évidemment, dans ce cas de figure industriel, les contraintes liées à l'assemblage des deux modules entre eux ont été respectées. La solution retenue pour réaliser la liaison encastrement entre les deux modules est un ensemble tenon – mortaise complété par 2 vis pour le maintien en position. Nous pouvons voir que le découpage en modules choisi par l'entreprise est proche de la solution émanant de l'utilisation de notre méthodologie de conception d'outillages modulaires. L'avantage apporté par notre méthodologie concerne la possibilité de faire ce choix de façon automatisé, sans connaissances spécifiques sur les procédés de fabrication.

Cet exemple permet de valider un certain nombre d'hypothèses prises au cours de l'élaboration de notre méthodologie. D'une part, le choix des indices de complexité de fabrication. Ici, les problèmes liés à la flexibilité de l'outil de coupe et, dans une moindre mesure, l'importante quantité de copeaux, révèlent les difficultés (au sens de coût important et de réelles difficultés d'obtention de la qualité souhaitée) qu'il peut y avoir à usiner une telle pièce. L'entreprise a estimé qu'il y aurait des difficultés, nous les avons évaluées quantitativement au travers des calculs d'indices et des cartographies. D'autre part, le choix d'une conception modulaire pour réduire ces difficultés. L'exploitation des résultats permet de concevoir la pièce en deux modules, qui correspondent globalement au découpage réalisé dans l'entreprise. De plus les analyses de complexité de fabrication effectuées sur les modules et les comparaisons qui en découlent permettent de mettre en évidence le gain apporté par l'approche modulaire.

Pour un travail dans un cadre industriel, il serait bien évidemment très intéressant de relier cette réduction de complexité de fabrication en une évaluation complète de la durée ou du coût de fabrication. Avec notre définition de la complexité de fabrication, une diminution de celle-ci exprime une réduction dans le coût ou la durée de fabrication pour une qualité égale. Cependant, il ne nous est actuellement pas possible de relier directement une évolution quantifiée de complexité de fabrication en une estimation chiffrée d'une évolution dans le coût global d'une pièce. Il serait pour cela nécessaire de définir une relation chiffrée entre la complexité de fabrication telle que nous la définissons et le coût réel de fabrication d'une pièce, mais cela n'a pas été traité dans le cadre de ce travail de thèse.

2. Études des outillages PSA Peugeot-Citroën

2.1. Cadre du travail : le projet EMOA

Le projet EMOA, dont le nom signifie Excellence dans la Maîtrise de l'Ouvrant Automobile haut de gamme (capot, porte, volet), est un projet piloté par PSA Peugeot-Citroën et labellisé par le pôle de compétitivité IDforCAR (anciennement pôle Automobile haut de gamme). L'IRCCyN est l'un des partenaires universitaires à l'origine de ce projet de grande envergure, c'est donc dans le cadre de ce projet que se sont déroulées ces études sur les outillages industriels PSA. Avant de développer le travail réalisé, nous présentons le projet dans son ensemble, en nous appuyant de façon majeure sur le descriptif présenté au pôle de compétitivité en juin 2007 [PSA07].

2.1.1. Contexte du projet

Le but clairement affiché des deux constructeurs automobiles français (Renault et PSA) est d'atteindre et de dépasser la meilleure concurrence mondiale dans le segment des berlines haut de gamme en termes de qualité et de fiabilité. L'aspect global d'un véhicule est la première sensation perçue par le client final et de ce fait, la finition des carrosseries automobiles requiert un haut degré de qualité.

Aujourd'hui, pour assurer une qualité irréprochable au stade de la production sur les prestations dites « différenciantes » telles que la qualité d'aspect, le confort et l'acoustique, il est nécessaire de réaliser un contrôle systématique de tous les véhicules. C'est ainsi qu'au final, chaque véhicule haut de gamme totalise plusieurs heures de contrôles (comme ceux présentés sur la Figure 119).

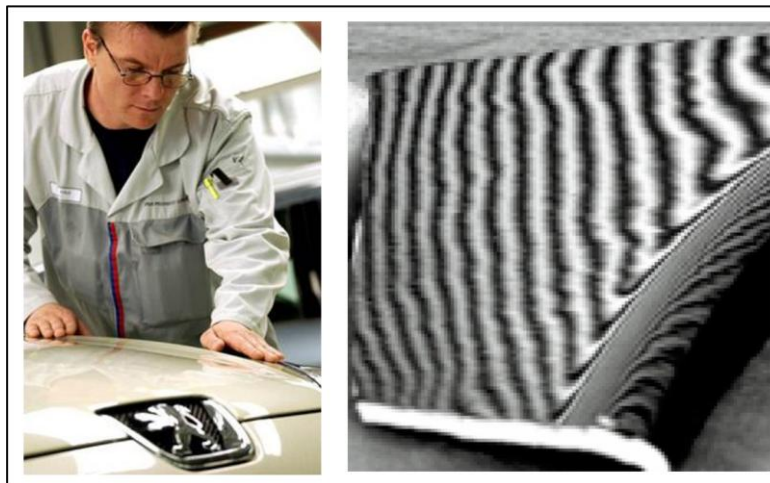


Figure 119. Exemples de contrôles d'aspect par paluchage et par inspection sous une chambre à néons.

Chaque caisse est scrutée unitairement à l'arrêt, toute la surface des tôles étant inspectée et touchée, (« paluchée » selon le terme admis), ce qui permet de vérifier le bon aspect et le bon tendu de la tôle et de traquer la moindre aspérité. Grâce à des étalons précis, un contrôle géométrique est également effectué afin de vérifier la conformité des jeux et affleurements des nombreuses pièces constituant la caisse. De plus, la qualité finale d'un véhicule produit en usine terminale dépend aussi, en amont, de la qualité des pièces produites en interne ou par les fournisseurs du constructeur.

D'autre part, les fournisseurs d'outillages d'emboutissage confrontés depuis quelques années à une baisse drastique des prix et à une concurrence accrue des pays à bas coût de main d'œuvre cherchent à

réduire leurs coûts de fabrication et visent à diminuer la part de mise au point des outillages au strict minimum. De plus, il est très difficile dans l'emboutissage profond d'amortir toute une série d'outils lorsqu'il s'agit d'une production à petite échelle. C'est la problématique majeure pour les outils d'emboutissage destinés à des ouvrants haut de gamme dont la cadence de production est fixée entre 100 et 150 véhicules / jour au lieu de 1000 à 1500 véhicules / jour pour les moyennes gammes (berlines familiales). En outre, la conjoncture actuelle liée à la crise économique mondiale pénalise encore plus les ventes et donc les cadences de production de l'industrie automobile, particulièrement pour les véhicules haut de gamme.

Cette stratégie, orientée qualité et coût, impose donc au fournisseur de réaliser les outillages respectant l'enveloppe de prix négociée dès l'attribution du marché et capables de produire des pièces suivant les critères fonctionnels et de qualité imposés par les constructeurs.

C'est pourquoi la société PCI (Process Conception Ingénierie), premier constructeur français de biens d'équipements pour l'industrie automobile (carrosserie, systèmes d'usinage et systèmes d'assemblages), créée en 1999, a monté le projet EMOA. Suite à une restructuration au sein de PCI, le projet est piloté directement par PSA depuis l'année 2008.

2.1.2. Description synthétique du projet

Le projet EMOA dimensionné à environ 8,5 M€ doit aboutir dans un délai de 3 ans (c'est-à-dire en juin 2010) à l'obtention et à l'industrialisation de « l'ouvrant automobile haut de gamme avant peinture et montable sur véhicule » alliant la meilleure performance économique et qualitative (aspect et géométrie). Ce projet regroupe des partenaires industriels (Arcelor, ESI Group, E. Leclerc, Ouest Emboutissage, Gruau, le CETIM et PSA), universitaires (le CROMEP des Mines d'Albi, l'université de Bretagne Sud, l'IRISA, l'Antenne de Bretagne de l'ENS Cachan et l'IRCCyN) et des financeurs (PSA et l'état français).

Les objectifs stratégiques du projet sont de maîtriser la qualité, réduire les coûts et les délais de mise en service des produits ouvrants haut de gamme automobile et sont traités suivant deux axes majeurs :

- Maîtrise parfaite de la mise en forme des tôles minces par emboutissage et sertissage ;
- Conception innovante des outils d'emboutissage et de sertissage pour la petite série haut de gamme.

Ce second axe est décliné en trois objectifs qui sont :

- L'allègement des contraintes imposées par les clients ;
- La conception des outillages pour leur tenue en service ;
- La conception des outillages pour les produire de manière économique.

Nos travaux s'inscrivent complètement dans ce dernier objectif, c'est pourquoi nous allons le détailler dans le paragraphe suivant, en explicitant la volonté de PSA au départ du projet dans ce domaine.

2.1.3. Optimisation des conceptions d'outillages pour la maîtrise du coût de réalisation

Les coûts de réalisation d'un outillage sont très fortement dépendants de la phase de conception de cet outillage. Les choix effectués lors de cette phase ne prennent pas assez en compte les aspects de fabrication et induisent ainsi des coûts de réalisation mal maîtrisés. Il est donc essentiel d'engager une

démarche type Design For Manufacturing afin de prendre en compte, dès la conception, les impératifs de la fabrication. Pour cela, trois pistes doivent être explorées et développées.

La première piste de recherche concerne la modularité pour une fabrication à moindre coût, en précisant qu'il peut être plus profitable de réaliser un outillage en plusieurs modules plutôt que monobloc. Cet aspect de modularité peut présenter de nombreux avantages d'ordre :

- Matériel : diminution des dimensions des machines utilisées ;
- Technique : on ne travaille que sur un des modules alors qu'en réalisation d'outillage complet, la situation de la zone à réaliser peut quelque fois être problématique pour le procédé de fabrication retenu ;
- Économique : en cas de détérioration partielle de l'outillage, on ne relance la réalisation que du ou des modules concernés (gain de temps et de moyens utilisés).

La deuxième piste s'intéresse aux moyens de fabrication innovants. La fabrication par ajout de matière est maintenant un moyen de réalisation mature qui permet d'obtenir des pièces de bonne qualité géométrique et avec des caractéristiques mécaniques quasi-identiques aux pièces obtenues par usinage. Ces nouveaux moyens trouvent leurs intérêts dans des fabrications unitaires ou petites séries (telles que les fabrications d'outillages) et dans des formes complexes et difficiles à obtenir par usinage. De plus, le fait de s'orienter sur la modularité dans les outillages va ainsi permettre d'obtenir des outillages réalisés avec des moyens de fabrication complémentaires et utilisés à bon escient.

Enfin la troisième piste est attachée à une méthodologie de conception et de fabrication. L'objectif est de capitaliser l'ensemble des résultats obtenus sur les deux premiers points pour proposer une méthode utilisable dès la phase de conception. Nous serons ainsi en mesure de prendre en compte les possibilités, les limites et les contraintes des procédés par enlèvement et ajout de matière dans la conception de l'outillage. La double approche « modulaire et multi procédés » permet d'obtenir un outillage dont les modules sont réalisés avec le procédé le plus adapté à sa forme et à sa fonction.

2.1.4. Conclusion

À la lueur des objectifs du projet EMOA, et spécifiquement du dernier point cité, nos travaux peuvent apporter beaucoup, et la méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides que nous avons développée a toute sa place dans ce projet industriel. Nous allons donc l'appliquer sur un outillage de PSA, afin de tester sa validité dans un cas de conception d'outillages d'emboutissage.

Ainsi, nous avons choisi avec PSA un outillage qui apparaît intéressant pour notre approche modulaire hybride. Il s'agit d'un outillage qui a été utilisé en phase de développement d'un véhicule. Nous avons souhaité vérifier la qualité de notre méthode sur cet outillage en deux étapes.

D'abord, nous utilisons notre approche et la maquette informatique sur le modèle numérique de l'outillage monobloc (tel qu'il a été conçu initialement) dans le but de disposer d'une première analyse de complexité de fabrication. À partir des résultats obtenus, les points de vue modulaire et hybride vont nous permettre de définir une conception en modules de l'outillage et de choisir le(s) procédé(s) de réalisation le(s) plus adapté(s) à chacun des modules. Les analyses de complexité de fabrication effectuées sur les modules, et la comparaison avec la première analyse nous permettent d'évaluer quantitativement le gain de notre approche.

Dans un second temps, l'idée est de produire un ensemble de pièces avec l'outillage monobloc, puis avec l'outillage modulaire hybride physiquement réalisé d'après les résultats de la première étape, afin de mesurer les écarts en termes de qualité sur les pièces produites. Cette seconde étude n'est pas réalisée dans le cadre de cette thèse, mais nous allons voir comment a été étudié le premier point

concernant l'utilisation de notre méthodologie dans un cas d'outillages d'emboutissage industriel. Nos travaux sur ce point ont d'ailleurs fait l'objet de deux communications en séances plénières lors des séminaires sur l'avancement du projet EMOA [KER07b] [KER09e].

2.2. Choix des outillages étudiés

Nous avons choisi, en accord avec PSA, un outillage prototype qui a été conçu et utilisé par PSA dans un cadre de développement d'un train arrière de véhicule. Il est composé d'une matrice et d'un poinçon, illustrés par les photos de la Figure 120 et dont les définitions numériques sont fournies sur la Figure 121.



Figure 120. Présentation de l'outillage PSA étudié.

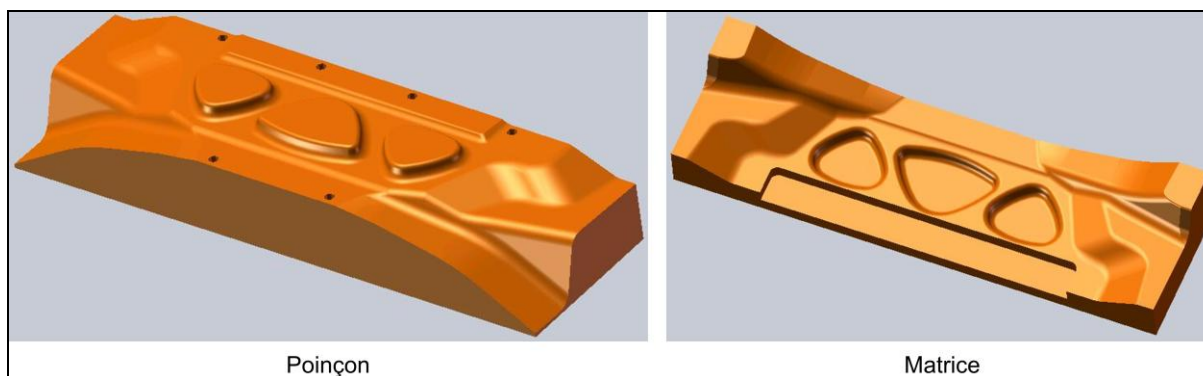


Figure 121. Définitions numériques de l'outillage étudié.

Plusieurs facteurs ont été déterminants dans ce choix. D'une part, il s'agit d'un outillage qui a déjà été utilisé par l'entreprise, ce qui est intéressant pour le second point de l'étude concernant la production effective de pièces avec l'outillage initial et avec l'outillage issu de l'application de notre méthodologie. D'autre part, la morphologie de l'outillage a également guidé notre choix. En effet, ses dimensions (environ 630 mm x 180 mm x 100 mm) sont plus importantes que celles de nos pièces-test préalablement utilisées, tout en restant dans des limites raisonnables pour une fabrication sur des machines non spécifiques. De plus, ces outillages présentent des formes pour lesquelles nous pouvons pressentir que les approches modulaires et hybrides vont offrir des perspectives intéressantes, notamment pour les parties centrales (les trois bossages sur le poinçon et les trois poches correspondantes sur la matrice). Ces perceptions instinctives de zones qui peuvent avantageusement être conçues avec un point de vue modulaire ou hybride proviennent des analyses des pièces-test

réalisées au cours du chapitre précédent. Elles restent à confirmer par l'application de notre méthodologie, c'est ce qui est expliqué au cours des paragraphes suivants.

2.3. Étude du poinçon

2.3.1. Analyse de complexité de fabrication par usinage

Cette première analyse est donc effectuée en utilisant notre maquette informatique avec comme point de départ le modèle CAO du poinçon. Les résultats sont présentés sur la Figure 122*.

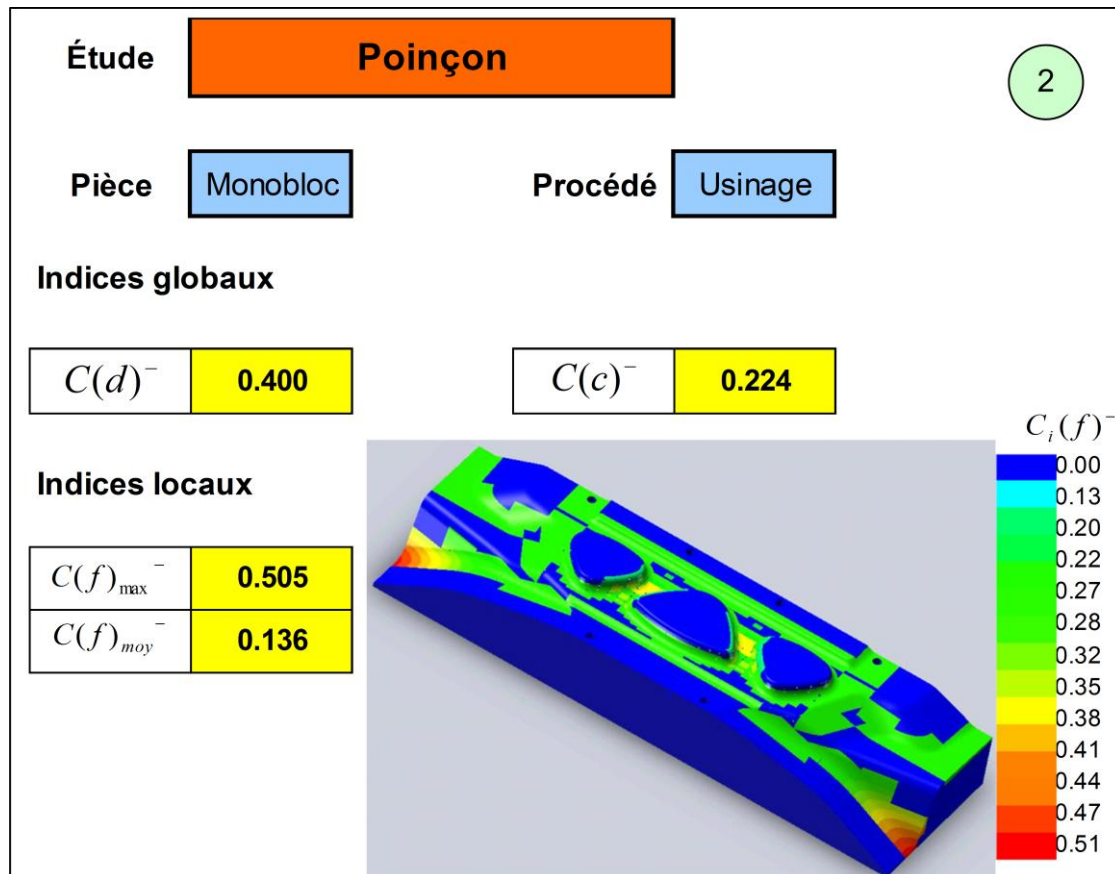


Figure 122*. Analyse de complexité de fabrication pour le poinçon monobloc.

La valeur de l'indice $C(d)^-$ est plus élevée que toutes celles obtenues auparavant. Cela est dû à la grande dimension de la pièce suivant la direction X qui impose l'utilisation d'une machine d'usinage avec des dimensions d'espace de travail compatibles. Dans notre base de données, la classe MACHINES comprend trois machines dont un centre d'usinage Mikron HPM 800. Cette machine, qui possède un espace de travail de plus grandes dimensions que les deux autres et donc un indice de coût relatif plus élevé, est la seule de la base de données qui soit utilisable pour réaliser cette pièce, ce qui explique la valeur plus importante pour cet indice lié aux dimensions maximales.

La valeur de $C(c)^-$, l'indice lié à la quantité de copeaux, n'est pas très importante.

En ce qui concerne la distribution des valeurs de l'indice lié à la flexibilité de l'outil de coupe représentée sur la cartographie de la Figure 122*, nous observons tout d'abord les zones les plus complexes, représentées en rouge, qui sont situées dans la partie de la pièce de plus basse altitude. La raison de cette complexité élevée est la grande valeur de L_{\min} pour les octants de cette zone. Nous distinguons également des zones entre les bossages dont la complexité est bien plus élevée que la

moyenne (zones en jaune pour lesquelles $C_i(f)^-$ vaut 0,38). Pour ces zones, la complexité est liée à une limitation du diamètre de l'outil de coupe par la distance D_{\max} entre octants voisins indirects suivant les directions perpendiculaires aux directions d'ouvertures. Le dernier constat est qu'il existe un nombre non négligeable de surfaces de couleur verte, correspondant à des octants avec des valeurs de r_f (rayon de fond) qui sont liées aux rayons de courbures des surfaces concaves.

Ces constats servent de données d'entrée pour l'application des points de vue modulaire et hybride.

2.3.2. Points de vue modulaire et hybride

Quelles sont les démarches à entreprendre pour tenter de diminuer les valeurs de ces indices ? Pour ce qui est de l'indice lié aux dimensions maximales, comme c'est la valeur dans une direction qui affecte la valeur de l'indice, il peut être judicieux de diviser la pièce en deux modules en conservant la moitié de la dimension incriminée. Cela revient alors à abaisser la valeur de l'indice $C(d)^-$ à 0.131, soit une diminution de 67 % par rapport à la solution monobloc. Cette baisse importante est à mettre au crédit de l'indice de coût relatif des différentes machines renseignées dans la base de données. Nous ne nous avancerons donc pas plus dans cette voie sur cet indice.

En revanche, dans le but de réduire la complexité de fabrication dans les zones centrales (en jaune), nous pouvons reprendre l'analyse réalisée lors de l'étude de la pièce-test 1 (Figure 91). Nous sommes en effet dans le même cas de figure puisque la valeur relativement élevée de l'indice est attribuée à la faible distance entre des octants voisins indirects. Il convient alors de réaliser en deux modules différents les octants concernés. En réalisant cette analyse pour les différentes zones de complexité équivalente, nous aboutissons à la réalisation de la pièce en deux modules, comme le montre la Figure 123.

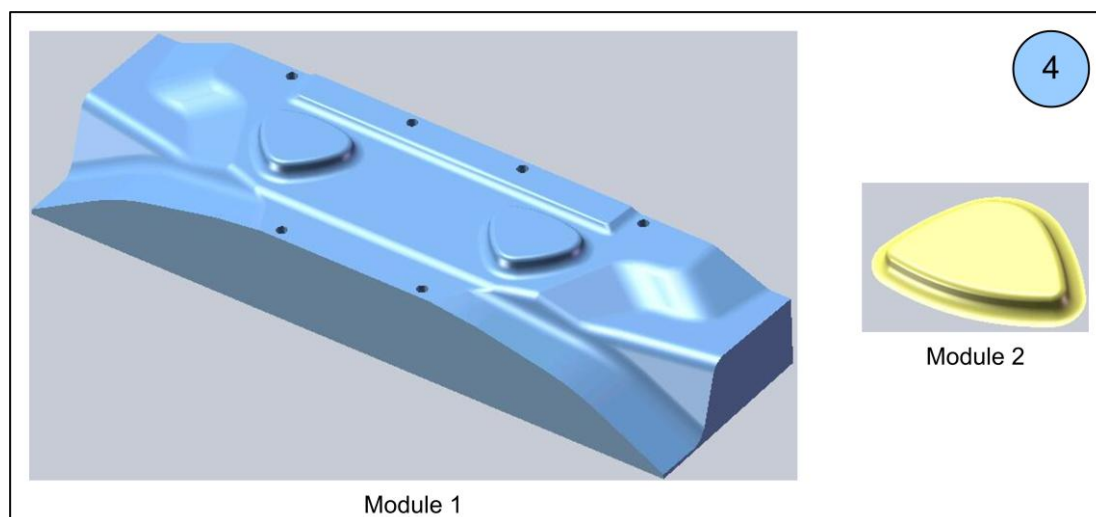


Figure 123. Proposition de conception modulaire pour le poinçon.

Enfin, si nous souhaitons également réduire la complexité dans les zones vertes, qui est due aux rayons de courbure des nombreuses surfaces concaves, il serait nécessaire d'opter pour un point de vue hybride, en choisissant une fabrication par ajout de matière pour les parties de l'outillage composant les octants concernés par cette valeur de complexité. Néanmoins, les valeurs de $C_i(f)^-$ dans ces zones restent relativement faibles et ne justifient alors pas de passer par un dépôt de matière sur la base usinée ou par la fabrication de modules par lit de poudre.

Nous en restons donc à l'approche modulaire, avec une conception en deux modules usinés, dont les contraintes d'assemblage ne sont pas prises en compte, et nous réalisons l'analyse de complexité de fabrication par usinage de ces modules puis le regroupement des modules.

2.3.3. Analyses de complexité de fabrication pour le poinçon modulaire

La Figure 124* présente les résultats fournis par la maquette informatique concernant les analyses de complexité de fabrication des modules, et le Tableau 12, concernant le regroupement des modules, est complété.

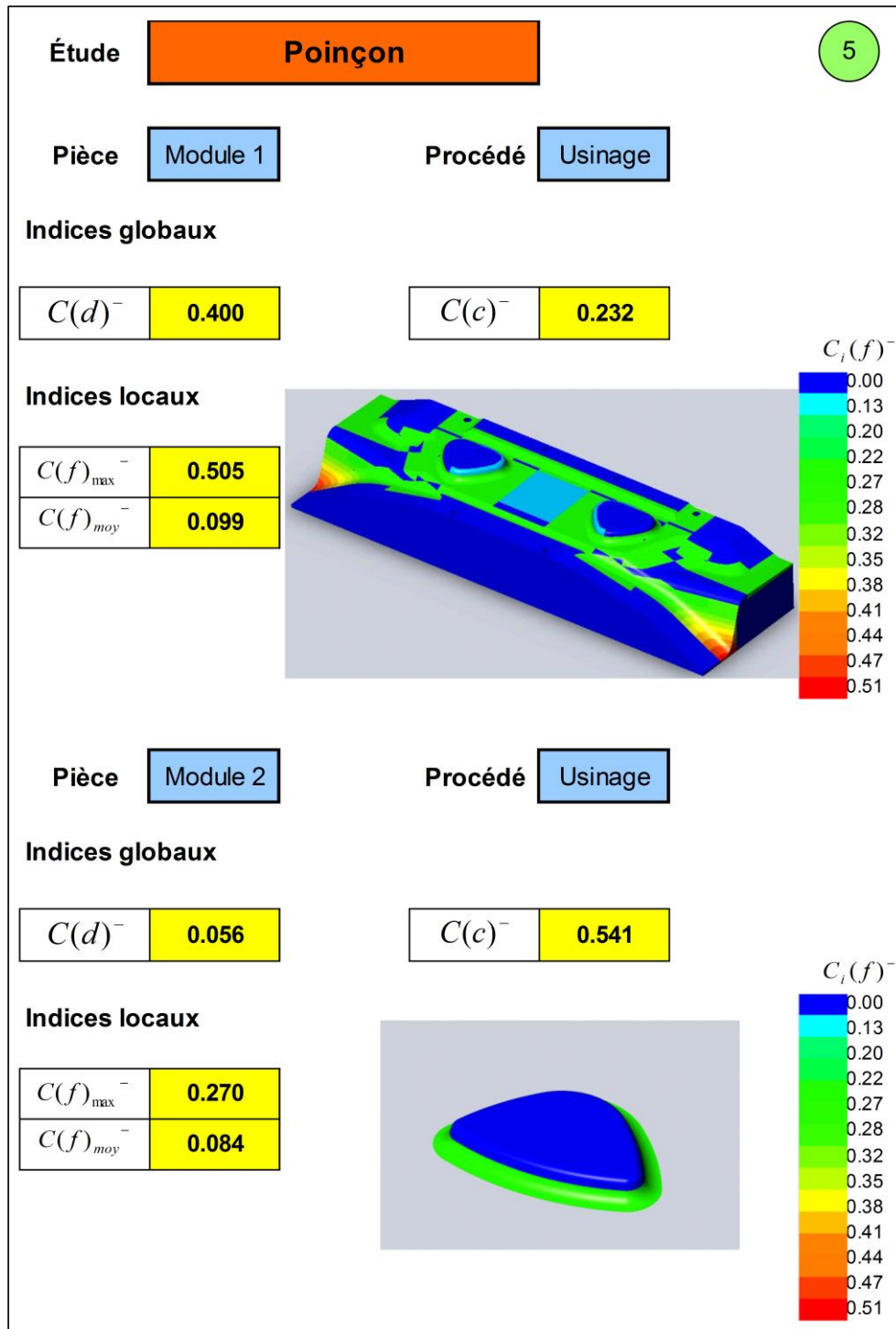


Figure 124*. Analyses de complexité de fabrication pour les modules composant le poinçon modulaire.

Étude	Poinçon		
Indice	Module 1	Module 2	Valeur totale
	$\omega_1 = 0.99$	$\omega_2 = 0.01$	
$C(d)^-$	0.400	0.056	0.397
$C(c)^-$	0.232	0.541	0.235
$C(f)_{\max}^-$	0.505	0.270	0.503
$C(f)_{\text{moy}}^-$	0.099	0.084	0.099

Tableau 12. Regroupement des modules pour la conception modulaire du poinçon.

Nous constatons, en observant sur la Figure 124* les cartographies de distribution des valeurs des indices $C_i(f)^-$ pour le poinçon monobloc et pour le module 1 du poinçon modulaire, que l'application du point de vue modulaire a permis de réduire la complexité dans des zones auparavant complexes. Bien entendu, cela n'a pas diminué la valeur maximale de la complexité, mais pour les zones centrales (en jaune sur la Figure 122*), la complexité a été sensiblement réduite (en bleu ciel sur la Figure 124*, ce qui correspond à une valeur de 0.13 lue sur l'échelle de couleurs créée lors de l'élaboration de la cartographie). Afin d'avoir une vision complète de l'évolution des indices entre la conception monobloc initiale et la conception modulaire proposée, nous allons réaliser la dernière étape de notre méthodologie.

2.3.4. Comparaison entre les complexités de fabrication des conceptions monobloc et modulaire

Pour comparer les deux études, nous utilisons notre maquette informatique. Les résultats sont présentés sur la Figure 125.

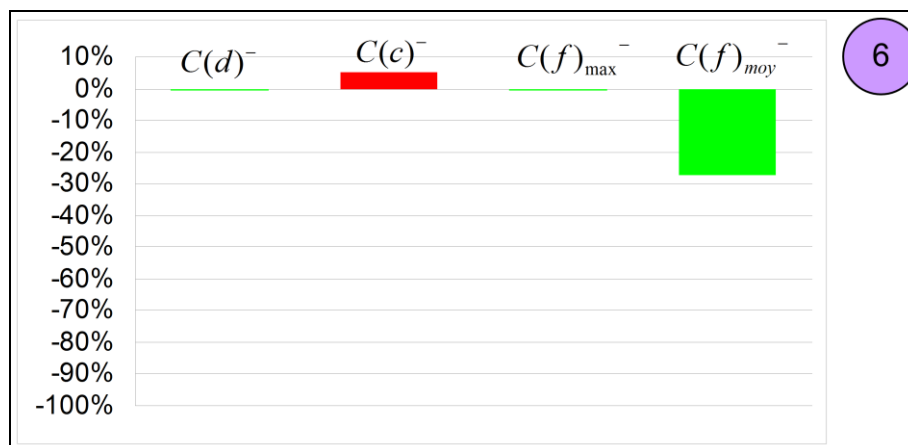


Figure 125. Comparaison des analyses monobloc et modulaire pour le poinçon.

Outre la diminution observée localement sur les cartographies, nous constatons une baisse de $C(f)_{\text{moy}}^-$, de 27%. Cette diminution n'est pas énorme, de plus, il existe une légère augmentation de

l'indice $C(c)^-$ (près de 5 %) et une stagnation des autres indices. Nous arrivons là dans un cas limite d'utilisation de notre méthodologie. En effet, ces évolutions ne nous permettent pas de conclure quant à un apport significatif de l'approche modulaire sur la diminution des coûts et délais de fabrication de l'outillage par rapport à la conception monobloc traditionnelle. Nous pouvons cependant affirmer qu'il y a une légère diminution de la complexité de fabrication, notamment dans des zones précédemment complexes à usiner. Mais compte tenu des hypothèses prises pour ces études (principalement en ce qui concerne l'assemblage des modules entre eux), nous ne pouvons pas annoncer que la conception en deux modules, telle que nous la proposons en utilisant notre méthodologie et la procédure informatique associée, permettra une réelle optimisation du triptyque coût – qualité – délai pour cet outillage.

2.4. Étude de la matrice

2.4.1. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la matrice monobloc

Nous passons désormais à l'étude de l'autre partie de l'outillage. Le modèle CAO utilisé comme point de départ d'utilisation de la méthodologie est celui présenté sur la Figure 121, il est correctement orienté par rapport aux exigences de notre maquette informatique. Nous commençons par l'analyse de complexité de fabrication par usinage pour cette pièce monobloc (Figure 126*).

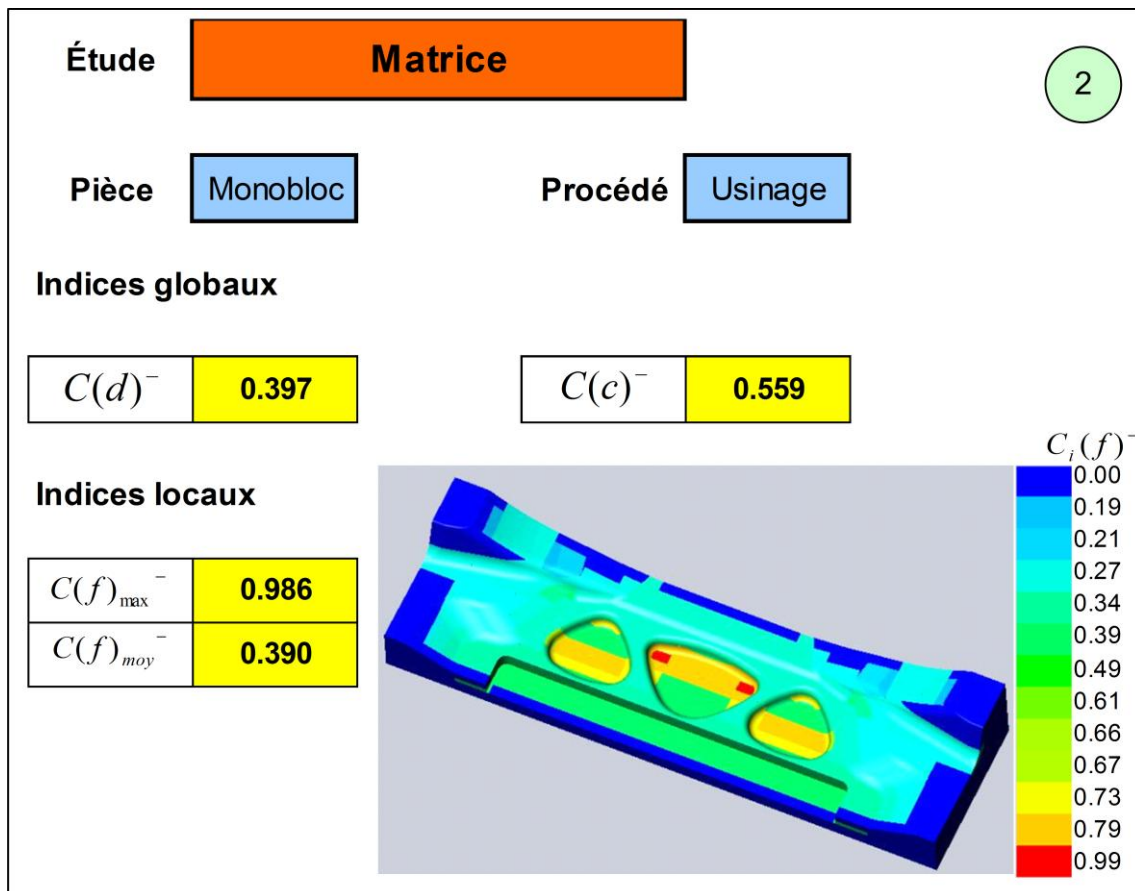


Figure 126*. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la matrice monobloc.

L'indice $C(d)^-$ a quasiment la même valeur que lors de l'étude du poinçon monobloc, car les deux pièces composant l'outillage ont sensiblement les mêmes dimensions maximales. Nous pouvons donc faire les mêmes remarques que précédemment pour cet indice.

Par contre, l'indice $C(c)^-$ a une valeur beaucoup plus élevée, ce qui témoigne d'une grande quantité de copeaux émanant de l'usinage de cette pièce. Pour remédier à cela, il pourrait être envisagé d'effectuer l'usinage de cette pièce à partir d'une pièce brute, réalisée par fonderie sable par exemple, dans laquelle la matière à enlever correspondrait uniquement aux surépaisseurs d'usinage.

Pour l'indice $C_i(f)^-$, la valeur maximale est très élevée (0.986) et s'approche de la limite de faisabilité technico-économique admise qui est de 1. Donc nous pouvons nous attendre à ce que les zones en rouge sur la cartographie soient délicates à réaliser, et qu'un temps relativement long sera nécessaire pour générer les surfaces dans cette zone avec une très bonne qualité. De plus, la valeur moyenne est également très élevée, il convient donc d'agir sur la conception de cette pièce pour diminuer la complexité de fabrication au moins pour cet indice. C'est l'objectif de la partie suivante.

2.4.2. Exploitation de l'indice $C_i(f)^-$

On s'intéresse donc aux valeurs élevées de l'indice $C_i(f)^-$, qui correspondent à des octants situés au niveau des trois poches centrales. Sur la cartographie, nous constatons des variations de couleurs dans les poches, à savoir vert – jaune – orange – rouge. Nous analysons donc séparément les valeurs des indices pour identifier d'où vient la complexité dans chacun des cas :

- $C_i(f)^- = 0,99$ (couleur rouge) : la valeur élevée de l'indice est liée à la faible valeur des rayons de coins rc dans ces zones qui limite le diamètre de l'outil de coupe compatible ;
- $C_i(f)^- = 0,79$ (couleur orange) : dans les zones oranges, c'est la distance D_{max} entre les octants voisins indirects dans les directions perpendiculaires aux directions d'ouvertures des octants de ces zones qui sont en cause ;
- $C_i(f)^- = 0,73$ (couleur jaune) : la valeur élevée de l'indice est une fois de plus liée à la faible valeur des rayons de coins rc dans ces zones, qui sont cependant plus importants que pour les surfaces contenues dans les octants rouges ;
- $C_i(f)^- = 0,39$ (couleur verte) : ici, la valeur de l'indice est donnée par la valeur du rayon de fond rf des poches. On pourrait s'attendre à avoir une limitation par la distance entre octants voisins indirects, mais elle n'intervient pas ici car le niveau maximal de la décomposition octree est fixé à 4, ce qui n'est pas suffisant pour obtenir des octants blancs au-dessus des octants contenant le fond de la poche. Donc ces octants n'ont pas de direction d'ouverture en Z^+ , il n'y a pas de D_{max} , et la limite sur le diamètre de l'outil de coupe provient uniquement de rf .

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, lorsque nous souhaitons réduire la complexité de fabrication liée à la flexion de l'outil de coupe dans des zones pour lesquelles ce sont des valeurs de rayons de courbure (rf ou rc) qui impactent la valeur des indices, il est nécessaire d'opter ici pour une réalisation hybride, en combinant l'ajout de matière à l'usinage. En effet, nous en revenons au cas de figure présenté au travers de l'exemple de la pièce-test numéro 2. Soit une modification des valeurs des rayons de courbure est acceptable, soit il faut se résoudre à changer de procédé de fabrication pour ces zones. Ici, les rayons sont imposés par des exigences de mise en forme lors de la production de pièces à l'aide de cet outillage, ils ne sont pas modifiables. Nous allons donc envisager une fabrication par ajout de matière.

2.4.3. Analyse de complexité de fabrication par ajout de matière pour la matrice monobloc et point de vue hybride

Nous réalisons alors, toujours grâce à notre maquette informatique, l'analyse de complexité de fabrication pour la matrice monobloc avec un choix de procédé par ajout de matière (Figure 127*).

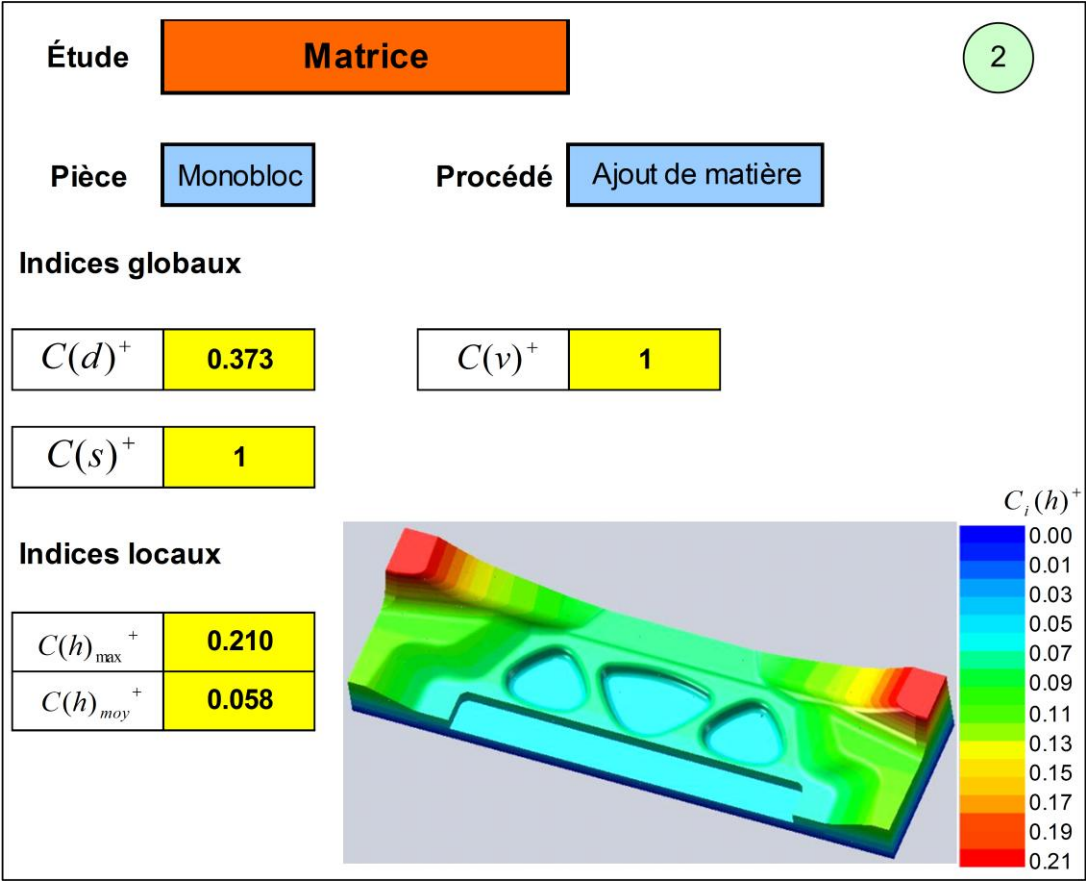


Figure 127*. Analyse de complexité de fabrication par ajout de matière pour la matrice monobloc.

Cette analyse sera utile pour une comparaison, puisque nous n'allons pas directement réaliser l'ensemble de la matrice en ajout de matière. En effet, il va maintenant falloir discerner les zones complexes à usiner qui peuvent être faciles à réaliser par ajout de matière afin de créer deux modules, l'un correspondant à une base usinée et l'autre correspondant aux formes à réaliser par dépôt de poudre métallique sur la base (dans le but de s'affranchir des contraintes d'assemblage, et sous réserve que la machine sélectionnée soit suffisamment performante pour cela). Nous obtenons alors la conception modulaire hybride de la matrice, présentée sur la Figure 128.

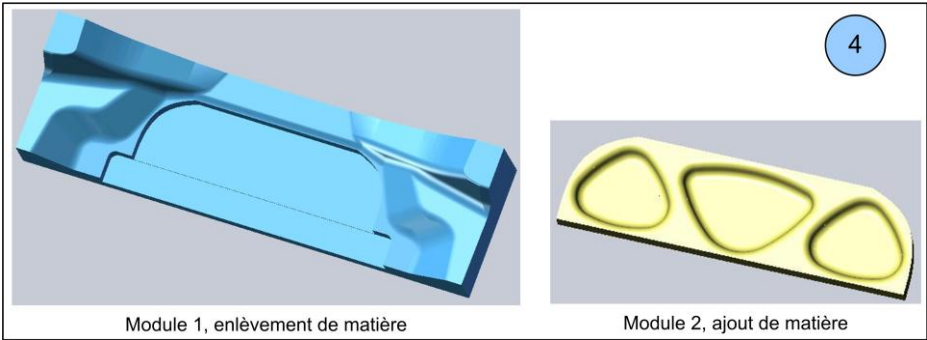


Figure 128. Conception modulaire hybride de la matrice.

2.4.4. Analyse de complexité de fabrication pour la conception modulaire hybride de la matrice

À partir de cette conception modulaire hybride, nous réalisons les analyses de complexité de fabrication par usinage pour le module 1 et par ajout de matière pour le module 2. Les résultats sont présentés sur la Figure 129*.

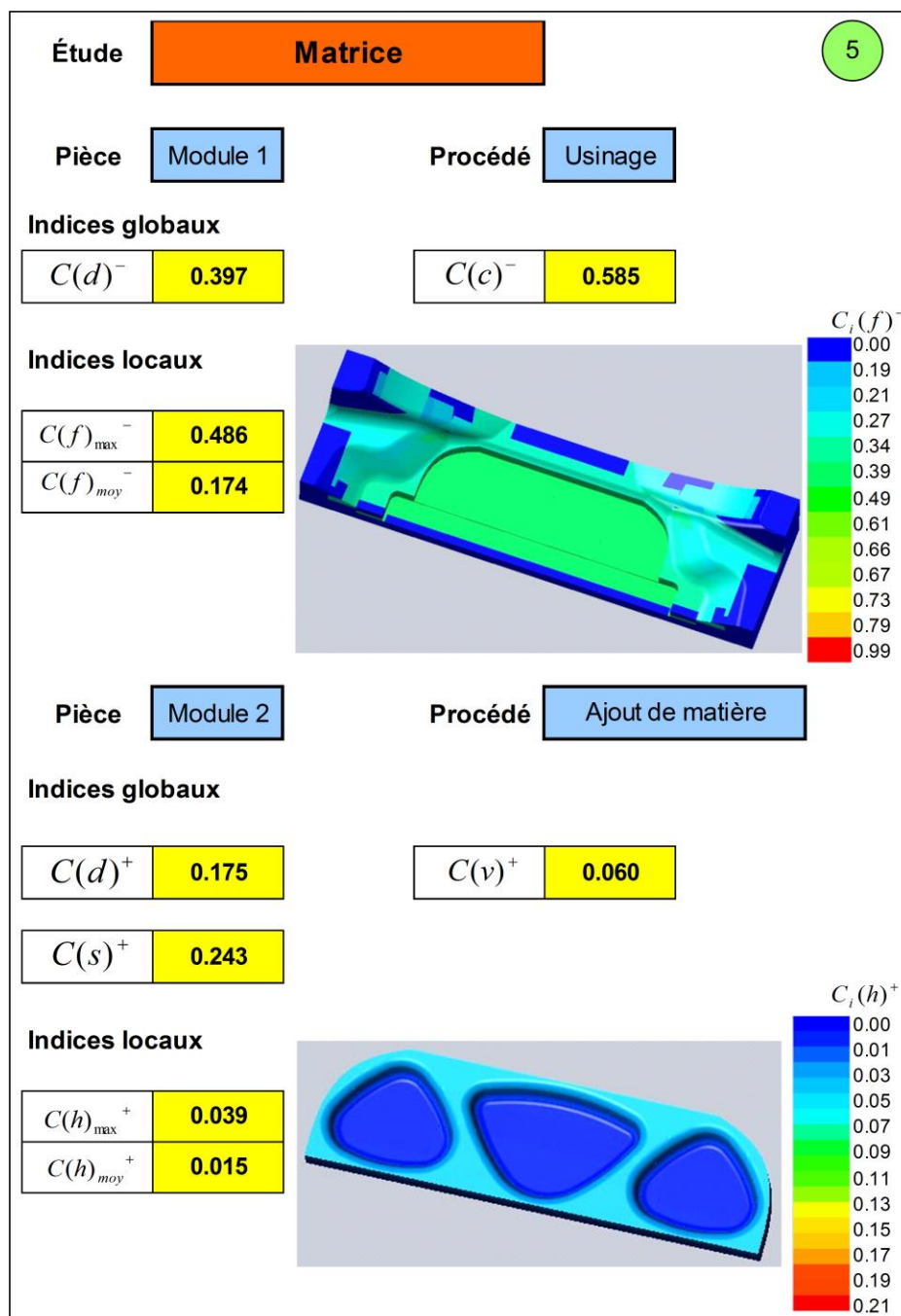


Figure 129*. Résultats des analyses de complexité de fabrication pour la conception modulaire hybride de la matrice.

Ces résultats sont à comparer avec les études de la matrice monobloc, ce qui serait fait dans la partie suivante. Nous pouvons d'ores et déjà mettre en avant l'évolution entre les cartographies de la Figure 129*, qui ont été réalisées avec les mêmes échelles de couleurs que les études monobloc, et

celles obtenues initialement (Figure 126* et Figure 127*). En effet, le module 1 réalisé par usinage ne comprend plus les zones précédemment les plus complexes (jaune – orange – rouge). De même pour le module 2, réalisé par ajout de matière, la hauteur est beaucoup plus faible pour le module que pour la pièce monobloc initiale.

2.4.5. Comparaison entre les conceptions monobloc et modulaire hybride pour la matrice

L'application de la dernière étape de la méthodologie consiste à comparer les études monobloc avec les modules, pour déterminer les évolutions apportées par les points de vue modulaire et hybride. Les résultats sont exposés sous forme d'histogrammes sur la Figure 130.

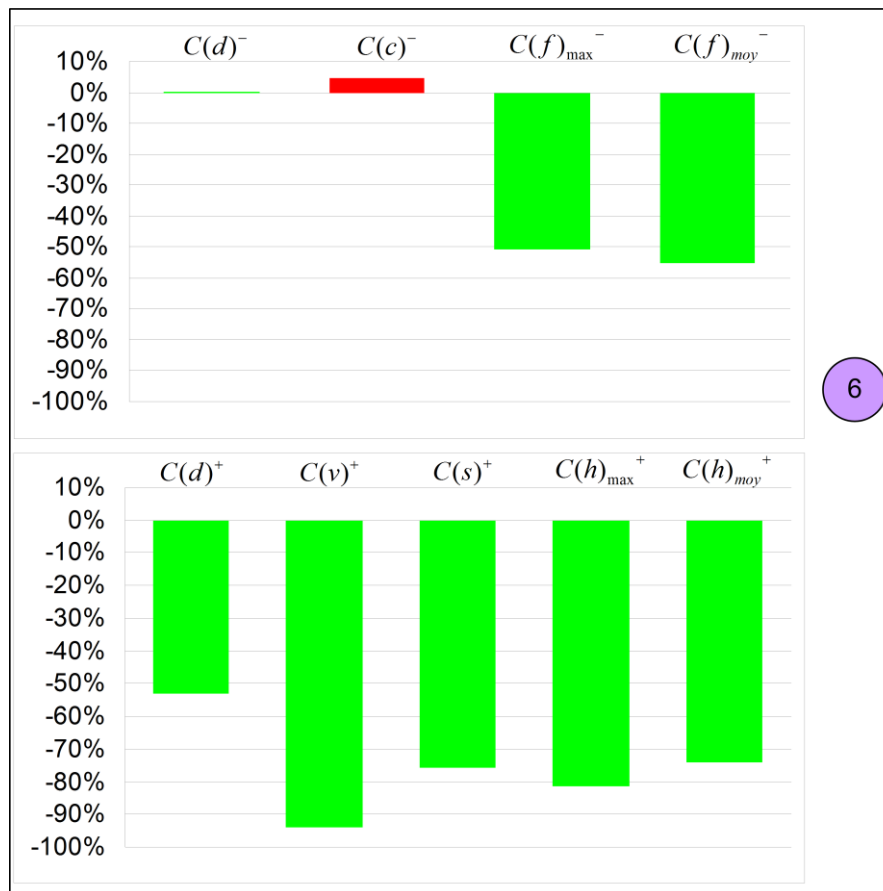


Figure 130. Comparaison des analyses de complexité de fabrication pour la matrice conçue avec les approches modulaire et hybride.

Mise à part la légère hausse de l'indice lié à la quantité de copeaux, qui s'explique par l'évidement supplémentaire nécessaire sur le module 1 pour laisser la place au module 2, tous les indices de complexité de fabrication ont diminué. Certaines baisses sont d'ailleurs très importantes : plus de 50 % pour les indices liés à la flexibilité de l'outil de coupe, qui nous posaient problème sur la pièce monobloc, une baisse de 75 % en moyenne sur l'ensemble des indices de complexité de fabrication par ajout de matière.

Sans pouvoir regrouper les deux modules pour comparer réellement la conception monobloc initiale avec la conception hybride en deux modules, nous pouvons tout de même conclure à une réduction générale des difficultés de fabrication grâce à la création d'un module réalisé par ajout de matière, ce module regroupant les zones les plus complexes à usiner de la pièce monobloc.

3. Conclusion sur les applications industrielles

Des applications industrielles sont d'une grande importance dans un travail de thèse en génie mécanique. En effet, les définitions de concepts, développements de méthodologies, créations de maquettes informatiques et autres essais de validations sur pièces-test se révéleront orphelins s'ils ne sont pas directement associés à une application sur des pièces industrielles. C'est pourquoi nous avons confronté notre approche avec des outillages « réels », conçus par des bureaux d'études industriels.

Dans le cas de la pièce Afoplast, nous avons vu que notre méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides permettait d'amener des données quantitatives justifiant les décisions prises par les concepteurs de la pièce. Comme il s'agit d'une pièce réalisée en deux modules, nous avons souhaité vérifier l'adéquation entre les options choisies intuitivement par l'entreprise et les informations émanant de notre méthodologie. Bien que nous n'ayons pas travaillé exactement sur la même géométrie de pièce, car nous l'avons quelque peu simplifiée pour en faciliter l'étude, nos résultats corroborent ceux de l'entreprise. Au niveau de l'analyse de complexité de fabrication pour la pièce initialement monobloc, notre maquette informatique fournit des résultats qui mettent en avant la possibilité d'utiliser le point de vue modulaire pour concevoir la pièce. Nous remarquons que le découpage en modules s'apparente à celui réalisé effectivement par l'entreprise. Enfin l'analyse de complexité de fabrication de la pièce modulaire, associée à l'étape de comparaison avec la conception monobloc, témoigne de la réduction possible de complexité de fabrication. Ainsi nous avons développé un outil de capitalisation des connaissances des experts de la conception, puisque notre méthodologie peut servir de base de réflexion pour une conception dans laquelle les contraintes de fabrication sont révélées.

Dans le cadre du projet EMOA, dont notre laboratoire est l'un des partenaires, nous avons pu travailler avec l'entreprise PSA Peugeot-Citroën sur un outillage complet utilisé dans une phase de développement d'un prototype. Cet outillage est constitué par une matrice et un poinçon conçus de façon monobloc, nous avons étudié ces deux pièces indépendamment l'une de l'autre avec notre méthodologie. Pour ce qui est du poinçon, l'application de notre procédure d'analyse de la complexité de fabrication met en évidence, entre autres, les zones les plus complexes à fabriquer au regard de l'indice de flexibilité de l'outil de coupe. Ainsi, nous proposons un découpage de la pièce en deux modules, ce qui permet de réduire la valeur de cet indice, mais pas de façon véritablement significative pour en conclure à une amélioration évidente de la fabricabilité grâce à notre approche modulaire. Pour la matrice, les difficultés de réalisation par usinage ne sont pas les mêmes et peuvent être réduites avec une approche hybride, en combinant procédés par ajout et enlèvement de matière. C'est ce qui a été montré avec la création des modèles CAO des modules et leurs analyses de complexité de fabrication, qui atteste de la possibilité de diminution de la complexité de fabrication par l'utilisation d'une combinaison méthodique de différents procédés de réalisation. La deuxième phase de la contribution de l'IRCCyN au projet EMOA, constituée par la fabrication des outillages modulaires hybrides ainsi définis et la mise en forme de pièces sous presse, devrait fournir des données supplémentaires quant à la validité de notre approche dans un cadre industriel. Mais nous pouvons déjà déduire de ces applications industrielles que notre méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides, telle qu'elle a été développée dans ces travaux et implémentée dans un logiciel de CAO, permet de fournir des informations pertinentes en phase de conception d'un outillage industriel.

Chapitre 6

Conclusions générales et perspectives

L'objectif de ces travaux est la proposition d'une méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides, basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication. Les chapitres précédents ont permis d'exposer la problématique associée et les traitements qui en découlent, constitués par la définition d'indices de complexité de fabrication, de la création de la méthode et de son implémentation au sein d'un logiciel de CAO, puis de divers essais de validations. Ce dernier chapitre a pour rôle de synthétiser le travail effectué et d'en dégager les perspectives en découlant.

La première partie est donc une reprise synthétique du travail réalisé. Il s'agit de révéler les concepts énoncés au cours des différentes parties du présent manuscrit, ainsi que les principaux résultats obtenus.

La seconde partie présente les conclusions qui peuvent être dégagées du travail effectué. Les apports de la méthodologie proposée sont ainsi mis en avant.

Enfin, un certain nombre de perspectives découlant de ces conclusions sont listées dans la troisième partie. Le but est de relater ici les voies possibles d'évolution de la méthodologie, les pistes de recherches ouvertes mais non traitées qui nous semblent intéressantes à étudier.

1. Synthèse du travail effectué

Les premiers constats énoncés au cours de ce travail concernent le contexte général de notre étude.

Nous nous situons bien évidemment en concordance avec la situation actuelle de l'industrie des produits manufacturés. Les évolutions au cours des dernières décennies entraînent un ensemble d'impératifs pour les entreprises manufacturières qui peuvent se résumer par cinq objectifs qu'il convient de maîtriser : coût – délai – qualité – flexibilité – impact environnemental. Les concepteurs et fabricants de produits se doivent donc d'utiliser les différentes technologies de fabrication disponibles sur le marché pour utiliser chacune à bon escient.

Les procédés de fabrication rapide par ajout de matière arrivent actuellement à maturité et deviennent désormais des alternatives intéressantes pour réaliser des pièces métalliques de géométries complexes, qui peuvent être très coûteuses à usiner et gourmandes en temps de fabrication. Ainsi, bien qu'un haut niveau de qualité soit encore délicat à obtenir, les possibilités de réalisation de formes difficiles, voire impossibles, à usiner par enlèvement de matière, rendent ces procédés très attractifs, notamment pour des pièces unitaires métalliques qui se retrouvent classiquement dans le domaine de la fabrication d'outillages.

Nous avons mis en évidence que les différentes méthodes d'aide à la conception d'outillages ont pour objectif l'optimisation de l'outillage vis-à-vis de son comportement pendant la phase d'utilisation, c'est-à-dire la mise en forme de pièces. Or la tendance est à la prise en compte du cycle de vie complet. Il ne suffit désormais plus de concevoir un produit pour qu'il réponde à des besoins d'utilisation, mais il devient nécessaire d'intégrer dès la conception des contraintes liées à la fabrication, l'assemblage, la maintenance, la fin de vie.

Nous cherchons alors à développer une méthode de conception d'outillages qui prenne en compte sa difficulté de réalisation, dans une approche de type Design for Manufacturing.

Afin de proposer des outillages qui répondent aux objectifs évoqués précédemment, nous envisageons de percevoir l'outillage non plus comme une entité monobloc (une seule pièce), mais comme un ensemble de modules, réalisés séparément puis assemblés. Les avantages sont multiples : prise en compte des évolutions géométriques de la pièce à mettre en forme, réalisation plus rapide et moins coûteuse tout en assurant le niveau de qualité désiré, choix du procédé de fabrication le plus adapté pour chaque module, etc. Nous créons donc le concept d'outillages modulaires hybrides.

Le point de vue modulaire s'accorde avec la nécessité de flexibilité dans les productions modernes, mais autorise également, dans certains cas, une fabrication plus aisée. Nous constatons cependant l'absence de méthodes robustes et fiables de découpages en modules pour améliorer la fabricabilité d'un produit lors de sa conception.

Le point de vue hybride permet d'utiliser les différents procédés de fabrication à bon escient, en choisissant pour chaque module le procédé le plus compétitif. Dans notre cas, nous nous limitons aux procédés par ajout et enlèvement de matière. Ainsi, les zones de l'outillage qui nécessitent, pour des raisons de coût ou de qualité, l'utilisation d'un procédé par ajout de matière vont être réalisées par une technologie additive et les zones pour lesquelles un procédé par enlèvement de matière est plus favorable vont être réalisées par usinage. Il devient alors nécessaire de bien connaître les limites technico-économiques de ces différents procédés.

À l'heure actuelle, les procédés par ajout de matière pèchent encore par manque de précision dimensionnelle et de qualité d'état de surface par rapport au procédé d'usinage. En revanche, les limites géométriques ne sont pas du tout les mêmes. Les dimensions limites des outils de coupe imposent des restrictions dans la topologie des surfaces qu'il est possible de générer par usinage, alors que la forme peut être beaucoup plus libre et complexe en fabrication par ajout de matière. On choisira donc de retenir l'usinage comme choix prioritaire pour réaliser les outillages, avec des parties réalisées par ajout de matière lorsque les limites de l'usinage sont atteintes.

Ainsi la méthode de conception d'outillages développée intègre les aspects modulaires et hybrides dès la phase de conception.

Elle repose sur une analyse quantifiée de la complexité de fabrication. Cette analyse concerne, selon notre définition, l'étude des paramètres de conception (géométriques, dimensionnels, choix de matériaux, définitions des spécifications) qui ont une grande influence sur le temps, le coût ou la qualité de fabrication.

Elle nécessite une double approche, globale et locale. En effet, nous devons impérativement effectuer une analyse détaillée de l'outillage afin de connaître le degré de complexité de fabrication de chaque zone, on parle alors d'analyse locale. Cela nécessite un découpage de l'outillage en zones, nous avons opté pour l'utilisation des décompositions octree. Il faut également considérer l'outillage dans sa globalité puisque des paramètres globaux vont également avoir un impact fort sur le temps, le coût ou la qualité de fabrication, on parle alors d'analyse globale.

Nous avons donc défini plusieurs indices de complexité de fabrication, globaux et locaux. Ils sont différents suivant que nous nous plaçons dans un cas de fabrication par ajout de matière ou par usinage.

Dans un premier temps, nous avons principalement mis l'accent sur les indices liés à des paramètres morphologiques de l'outillage. Ces indices sont calculés à partir du modèle CAO de l'outillage, d'une base de données fabrication (renseignée par des informations simples sur les machines de fabrication disponibles et sur les outils de coupe dans le cas de l'usinage).

Une maquette informatique implémentée dans un logiciel de CAO a été réalisée afin de valider la démarche méthodologique en reprenant de façon la plus automatisée qu'il soit, l'ensemble des étapes de la méthode de conception. Elle s'appuie sur une représentation par objets des différentes données utilisées.

Elle permet d'une part le calcul des indices globaux et locaux, avec l'obtention de cartographies de distribution des valeurs pour les analyses locales, et d'autre part la comparaison de plusieurs conceptions afin d'évaluer quantitativement l'évolution de la complexité de fabrication entre deux conceptions (par exemple, une conception monobloc initiale et une conception modulaire hybride).

Nous avons ainsi pu tester, grâce à l'étude de différentes pièces-test en phase de conception, les différentes possibilités d'utilisation de la méthodologie et de la maquette informatique associée, qui sont principalement :

- Une approche modulaire pour diminuer la complexité de fabrication dans le cas où un seul procédé de fabrication est retenu ;

- Une approche hybride, permettant de combiner astucieusement les procédés par ajout et enlèvement de matière lorsque des zones apparaissent trop complexes à réaliser par usinage ;
- La détection d'incompatibilités entre le modèle numérique et le procédé de fabrication, du type arêtes vives ou formes intérieures incompatibles avec l'usinage.

Nous avons également validé notre méthodologie avec des applications industrielles, en partenariat avec les entreprises Afoplast, spécialisée dans la fabrication de moules, et PSA Peugeot-Citroën, dans le cadre d'un projet de grande envergure labellisé par le pôle de compétitivité *IDforCAR*.

Ce sont notamment ces essais réalisés sur des outillages industriels qui nous ont permis de détailler les points forts et les limitations de notre travail, que nous reprenons dans la partie suivante.

2. Conclusions : les apports de notre travail

Nous reprenons dans cette partie les apports de notre travail suivant deux points majeurs : d'une part, l'évaluation de la complexité de fabrication grâce aux indices que nous avons définis, et d'autre part, l'exploitation que nous en faisons au travers de la méthodologie développée.

La première conclusion que nous énonçons concerne donc les indices de complexité de fabrication.

Notre définition originale de la complexité de fabrication et l'analyse des paramètres de conception qui influencent le temps, le coût ou la qualité de réalisation nous ont permis de définir des indices de complexité de fabrication. L'un des avantages de ces indices est qu'ils sont tous calculables directement à partir du modèle CAO d'une pièce. Il est simplement nécessaire de préciser quelques renseignements concernant les machines de fabrication disponibles et la gamme d'outils de coupe utilisés pour l'usinage, mais aucune information technique sur la fabrication n'est utile. Nous nous affranchissons ainsi de la phase de préparation de la fabrication, qui n'est pas le cœur de métier des concepteurs d'outillages, afin de fournir à ces derniers un maximum de données sur les difficultés de fabrication de l'outillage qu'ils sont en train de concevoir.

Nous entrons bien ici dans un cadre de DFM, et le calcul de ces indices peut s'apparenter à un simulateur de difficultés de fabrication.

Notre proposition d'utiliser une décomposition octree comme base d'étude d'une pièce zone par zone apparaît également originale, et permet de parer aux désagréments des décompositions en entités qui subsistent lorsque nous envisageons la fabrication d'une forme de géométrie complexe par ajout de matière. L'association d'indices locaux aux fractions de l'outillage contenues dans les octants est à l'origine du tracé de cartographies de complexité de fabrication.

Ces cartographies, associées à des échelles de couleurs appropriées et complétées par des valeurs d'indices globaux constituent une évaluation quantitative de la complexité de fabrication qui est le socle de notre méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides.

Le développement d'une méthode de conception d'outillages intégrant les aspects modulaires et hybrides constitue l'un des points-clés de notre travail. La méthodologie en 6 étapes que nous proposons a fait l'objet d'un développement informatique dans un logiciel de CAO, et les interfaces de dialogues homme – machine se révèlent être très simples à utiliser. Ce qui permet donc d'obtenir aisément des résultats d'analyses de complexité de fabrication et des comparaisons entre différentes conceptions. Ces résultats sont alors exploitables pour en déduire les modifications nécessaires sur un modèle CAO dans le but de diminuer la complexité de fabrication.

C'est ainsi que les exemples d'analyses sur les pièces-test et les applications industrielles que nous avons étudiées reflètent les différentes possibilités d'utilisation de notre méthodologie. Les recommandations pour réduire la complexité de fabrication, qui émanent des cheminements de pensée expliqués pour chaque indice, peuvent aboutir à trois alternatives : point de vue modulaire, point de vue hybride ou modification des paramètres de conception.

Le premier choix évoqué, consistant à réaliser une pièce comme un ensemble de modules réalisés séparément puis assemblés tout en conservant le même procédé de fabrication, nous semble novateur

dans le sens où, jusqu'à présent, les conceptions modulaires reposent presque exclusivement sur des intuitions des experts de la fabrication.

Nous avons montré, avec la première pièce-test, l'étude de la pièce Afoplast et celle du poinçon PSA, que ce choix peut désormais être effectué méthodologiquement, à partir d'évaluations quantitatives de la complexité de fabrication et d'une comparaison entre la conception monobloc initiale et la conception en modules.

Le second choix concerne l'exploitation du point de vue hybride pour réduire la complexité de fabrication. Là encore, notre travail apporte une dimension méthodologique au choix, en s'intéressant à utiliser les procédés par ajout de matière dans les zones pour lesquelles l'usinage ne s'avère pas être technico-économiquement valable, voire est impossible. Les progrès des procédés de fabrication rapide nous laissent entrevoir la possibilité de réaliser un dépôt de poudre métallique directement sur une base usinée.

Les études de la seconde pièce-test et de la matrice PSA ont permis d'exploiter ce point de vue hybride, en envisageant la réalisation par ajout de matière des zones les plus complexes à usiner.

Enfin, la troisième alternative pour réduire la complexité de fabrication est la modification des paramètres de conception qui engendrent des valeurs d'indices très élevées. En effet, notre méthodologie met en évidence d'une part le degré de complexité d'une pièce, ou de certaines zones d'une pièce avec les cartographies, mais elle détaille également les facteurs ayant un impact fort sur ces valeurs. Le choix est ensuite laissé au concepteur de savoir s'il peut, ou non, modifier ces facteurs afin de diminuer sensiblement la complexité de fabrication sans affecter pour autant les caractéristiques finales de l'outillage conçu.

Nous avons vu également que les cartographies se révélaient être un outil performant de détection d'incompatibilités entre le modèle CAO conçu et le procédé de fabrication retenu. Certaines de ces incompatibilités peuvent se résorber par une légère modification des facteurs incriminés, ou par l'application de points de vue modulaire et hybride, selon le choix du concepteur.

L'intérêt principal de notre travail sur ces trois alternatives réside donc dans l'aspect méthodologique et dans la structuration des informations résultant des analyses de complexité de fabrication et de leurs comparaisons.

Cependant, tous les verrous n'ont pas été levés, les perspectives découlant de ce travail sont donc multiples. Ce sont ces perspectives que nous dévoilons dans la partie suivante.

3. Perspectives

Nous présentons les perspectives de nos travaux en respectant les deux points majeurs énoncés dans la conclusion, c'est-à-dire que nous évoquons d'abord les perspectives liées aux indices, puis celles liées à l'exploitation de ceux-ci grâce à la méthodologie.

En ce qui concerne les indices de complexité de fabrication, nous avons listé l'ensemble des paramètres de conception qu'il est nécessaire de prendre en compte pour estimer efficacement la complexité de fabrication.

Nous nous sommes concentrés principalement sur les paramètres morphologiques, il reste donc à définir des indices pertinents en liaison avec les spécifications (géométriques et dimensionnelles) et les caractéristiques des matériaux. Nous avons commencé à mettre en place des indices pour l'usinage à partir de données sur la dureté des matériaux et l'état de surface, mais ils n'ont pas été encore implémentés dans la maquette informatique. Nous pouvons noter que l'ajout d'indices à la maquette informatique est aisé, dès lors que nous pouvons en écrire une procédure de calcul automatique.

Il restera cependant à étudier la récupération des données de conception nécessaires aux calculs des indices.

Des indices en liaison avec l'orientation des surfaces seraient également très intéressants à développer. En effet, l'orientation des surfaces permet de définir, dans le cas de l'usinage, si une machine-outil 3 axes est suffisante pour réaliser l'ensemble des surfaces en un seul posage, s'il est nécessaire de passer à une machine 4 ou 5 axes ou s'il faut avoir recours à de multiples posages. Toujours dans le cas de l'usinage, l'évolution de l'orientation des surfaces contiguës permet aussi de définir un niveau de complexité de fabrication, puisque de fortes variations dans ces orientations vont produire de fortes altérations dans la vitesse des axes, augmentant alors la durée d'usinage.

Dans le cas de pièces fabriquées par ajout de matière, l'analyse de l'orientation des surfaces de peau permet de définir la meilleure orientation de la pièce dans l'espace de travail et de connaître alors les zones pour lesquelles la fabrication de supports sera nécessaire. Ces zones vont alors devenir complexes à fabriquer, puisqu'elles vont induire un coût et un temps supplémentaires.

Pour les indices qui nécessitent des informations issues de la base de données fabrication, nous pouvons également envisager de moderniser la définition des indices de coût relatif des machines et des outils afin d'améliorer les choix qui en découlent.

Pour ce qui est de la méthodologie développée, nous avons vu que les comparaisons restent encore limitées à cause du manque de compatibilités entre les indices lors d'une approche hybride. Lors d'une approche modulaire (même procédé de fabrication envisagé pour la pièce monobloc et l'ensemble des modules), les indices des différents modules peuvent être regroupés pour donner une image de l'ensemble de la pièce modulaire afin de faciliter la comparaison monobloc – modulaire. Pour ce faire, nous avons utilisé un coefficient de pondération qui tient compte de la part du volume du module considéré dans la pièce complète.

Ce coefficient pourrait être amélioré pour prendre en considération les difficultés liées à l'assemblage des différents modules.

En ce qui concerne l'assemblage, nous n'avons pas encore intégré les contraintes engendrées par la réalisation de liaison encastrement entre les modules.

Comme nous l'avons évoqué, dans le cas d'une fabrication hybride, nous envisageons la possibilité de déposer de la poudre métallique directement sur une base usinée. Dans ces conditions, les contraintes d'assemblage et de fabrication ne sont pas du tout les mêmes et nécessiteraient d'être étudiées finement.

Il existe encore une étape difficilement implémentable au sein de la maquette informatique, qui concerne la création automatique des modèles CAO des modules.

Cette étape de conception des modules reste, en l'état actuel de la maquette informatique, une étape manuelle. À partir des résultats de l'analyse de complexité de fabrication pour la pièce monobloc, c'est-à-dire les valeurs des indices globaux et les cartographies de distribution des valeurs des indices locaux, l'utilisateur se base sur les cheminements d'exploitation des indices afin de créer les modèles numériques des modules. Nous n'avons effectivement pas encore développé de procédure informatique liée à cette étape pour deux raisons principales.

Premièrement, la difficulté inhérente à l'automatisation de règles de conception rend extrêmement délicate son implémentation dans un logiciel de CAO. Il faudrait être en mesure de prendre en compte la création automatique de surfaces d'assemblages et toutes les modifications que cela implique au niveau des pièces.

Secondement, notre méthodologie étant basée sur la complexité de fabrication (donc par extension sur les objectifs coût – qualité – délai), nous ne tenons pas compte des objectifs flexibilité et impact environnemental rendus possibles par l'utilisation de modules. Ainsi pour définir efficacement les modules, il serait pertinent d'associer à notre approche modulaire basée sur la complexité de fabrication des approches modulaires basées sur l'adaptabilité aux différentes variantes de produits et sur la maîtrise de l'impact environnemental. Nous serons alors en mesure de proposer une conception modulaire intégrant un maximum d'objectifs.

Les possibilités d'application de la méthodologie développée sont multiples et n'ont pas pu être toutes testées.

Nous pensons notamment à des études sur les dimensions maximales par ajout de matière pour choisir un découpage optimisé en modules réalisables sur des machines de petites dimensions, en mettant en avant les indices $C(d)^+$ et $C(v)^+$ par exemple.

Un autre point que nous imaginons pouvoir faire l'objet d'études intéressantes concerne l'orientation d'une pièce dans l'environnement machine pour une fabrication rapide. Bien que de nombreux travaux existent dans la littérature sur ce sujet, l'utilisation d'indices de complexité tels que $C_i(h)^+$ et $C_i(\rho)^+$ apporterait des données quantifiées sur les difficultés de réalisation de différentes configurations, ce qui pourrait permettre de faire un choix raisonné d'orientation.

Enfin, l'utilisation de la méthodologie pour la détection d'incompatibilités entre le modèle numérique et le procédé de fabrication mériterait également une étude approfondie.

Les travaux que nous avons menés peuvent également s'inscrire dans un cadre plus large, lié à la maîtrise et à l'optimisation des process de production. En effet, nous avons vu que l'intégration de

contraintes de fabrication dans la phase de conception est un facteur-clé de réussite du développement d'un produit.

Il convient alors, dans un premier temps, de maîtriser les possibilités et limites des différents procédés de fabrication disponibles, en n'omettant pas les procédés novateurs un peu moins connus tels que les procédés de fabrication rapide par ajout de matière, et dans un second temps de développer des processus de conception qui utilisent ces limites afin de considérer, dès la phase de conception, les contraintes liées à la future fabrication du produit. Notre méthodologie se veut être une pierre de ce large édifice.

Pour que l'ensemble des procédés disponibles soit pris en compte, il est désormais nécessaire de s'intéresser aux technologies de fabrication rapide, dont les limites et les méthodes d'utilisation restent encore trop peu étudiées. Leur développement et leur intégration complète au sein de l'industrie moderne passeront par des connaissances pointues dans le domaine du Design For Rapid Manufacturing.

Notre étude constitue en quelque sorte une première approche de ce domaine, il reste encore de nombreux travaux à effectuer dans ce sens.

Nous terminons par un dernier point qu'il devient nécessaire de traiter : la réalisation physique d'outillages modulaires hybrides conçus grâce à notre méthodologie.

L'objectif est double. D'une part, il s'agit de vérifier l'adéquation avec la mise en forme de pièces (phase d'utilisation de l'outillage) et, d'autre part, de consolider les liens qui peuvent exister entre une évolution dans la complexité de fabrication telle que nous la définissons et les données chiffrées de temps, de coût et de qualité de fabrication.

Les poursuites des études sur les outillages PSA dans le cadre du projet EMOA vont dans ce sens.

Références bibliographiques

- [ALL02] ALLANCON, P. Fonderie rapide des alliages de magnésium - Obtention de parois minces. Mémoire de DEA, École Centrale de Nantes, 2002.
- [ALT01] ALTAN, T., LILLY, B., YEN, Y.C. Manufacturing of dies and molds. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2001, vol. 50/2, p. 404-422.
- [ARB82] ARBAB, F. Requirements and architecture of CAM-Oriented CAD systems for design and manufacture of mechanical parts. Ph.D. Thesis, 1982.
- [ARM08] ARMILLOTTA, A. Selection of layered manufacturing techniques by an additive AHP decision model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008, vol. 24, p. 450-461.
- [ASH04] ASHBY, M.F. Choix des matériaux en conception mécanique. Dunod, 2004.
- [AZE04] AZERNIKOV, S., FISCHER, A. Efficient surface reconstruction method for distributed CAD. *Computer-Aided Design*, 2004, vol. 36, p. 799-808.
- [BAL00] BALASUBRAMANIAM, P., LAXMIPRASAD, P., SARMA, S. et al. Generating 5-axis NC roughing paths directly from a tessellated representation. *Computer-Aided Design*, 2000, vol. 32, p. 261-277.
- [BAN07] BANERJEE A.G., GUPTA, S.K. Geometrical algorithms for automated design of side actions in injection moulding of complex parts. *Computer-Aided Design*, 2007, vol. 39, p. 882-897.
- [BAP06] BAPTISTA, R., SILVA, M.B., SARAIVA, C. Developments for rapid tooling application in sheet metal forming. *Advanced Materials Forum III - Materials Science Forum*, 2006, vol. 514-516, p. 1516-1520.
- [BAR98] BARAQUET, G., KAPLAN, Y. A data front-end for layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 1998, vol. 30/4, p. 231-243.
- [BER99] BERRY, W.L., COOPER, M.C. Manufacturing flexibility: Methods for measuring the impact of product variety on performance in process industries. *Journal of Operations Management*, 1999, vol. 17, p. 163-178.
- [BID98] BIDARRA, R., JAN DE KRAKER, K. BRONSVOORT, W.F. Representation and management of feature information in a cellular model. *Computer-Aided Design*, 1998, vol. 30/4, p. 301-313.
- [BLA92] BLANTHER, J.E. US Patent 473,901, 1892.
- [BOI02] BOILLAT, E., GLARDON, R., PARASCHIVESCU, D. Optimisation thermique de moules d'injection construits par des processus génératifs. *Journal de Physique IV*, 2002, vol. 12/11, p. 27-38.
- [BOI07] BOISSELIER, D., SANKARE, S., GAUFILLET, J.P. Rechargement laser et fabrication rapide - Performances – Applications. *Journées nationales du club laser et procédés*, Limoges (France), 2007.

- [BON08a] BONNARD, R., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. Rapid manufacturing project description in STEP-NC model. *56th ISO TC184/SC4 meeting, Future of Step for manufacturing activities*, Pusan (Corée du Sud), 2008.
- [BON08b] BONNARD, R., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. Rapid prototyping project description in STEP - NC model. *Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, 2008, vol. 6, p. 357-362.
- [BON09] BONNARD, R. MOGNOL, P. HASCOET, J.Y. Integration of rapid manufacturing processes in a high-level numerical chain. *4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria (Portugal), 2009, 6 p.
- [BOU04] BOUAZIZ, Z., BEN YOUNES, J., ZGHAL, A. Methodology of machining costs evaluation for die and mould manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 152, p. 237-245.
- [BRA05] BRAVO, U., ALTUZARRA, O., LOPEZ DE LACALLE, L.N. et al. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, vol. 45, p. 1669-1680.
- [BRO08] BROUSSEAU, E., DIMOV, S., SETCHI, R. Knowledge acquisition techniques for feature recognition in CAD models. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2008, vol. 19, p. 21-32.
- [BYU05] BYUN, H.S., LEE, K.H. A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, vol. 26, p. 1338-1347.
- [CAK05] CAKIR, M.C., IRFAN, O., CAVDAR, K. An expert system approach for die and mold making operations. *Robotics and Computer-Integrating Manufacturing*, 2005, vol. 21, p. 175-183.
- [CHA01] CHANG, K.H., TANG, P.S. Integration of design and manufacturing for design shape optimization. *Advances in Engineering Software*, 2001, vol. 32, p. 555-567.
- [CHA03a] CHAN, S.F., LAW, C.K., CHAN, K.K. Computerised price quoting system for injection mould manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 179, p. 212-218.
- [CHA03b] CHAN, C.K. Minimum bounding boxes and volume decomposition of CAD models. Ph.D. Thesis, University of Hong Kong, 2003, 360 p.
- [CHA04] CHAN, C.K., TAN, S.T. Putting objects into a cylindrical/rectangular bounded volume. *Computer-Aided Design*, 2004, vol. 36, p. 1189-1204.
- [CHA05] CHAN, C.K., TAN, S.T. Volume decomposition of CAD models for rapid prototyping technology. *Rapid Prototyping Journal*, 2005, vol. 11/4, p. 221-234.
- [CHA07] CHANAL, H., RAUCH, M., HASCOET, J.Y. et al. A new approach for the geometrical calibration of parallel kinematics machines tools based on the machining of a dedicated part. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, vol. 47, p. 1151-1163.
- [CHA98a] CHABLAT, D. Domaines d'unicité et parcourabilité pour les manipulateurs pleinement parallèles. Thèse de doctorat, Université de Nantes et École Centrale de Nantes, 1998, 185 p.

- [CHA98b] CHAN, K., KING, C., WRIGHT, P. COMPASS: Computer Oriented Materials, Processes, and Apparatus Selection System. *Journal of Manufacturing Systems*, 1998, vol. 17/4, p. 275-286.
- [CHE01] CHEN, Y.H., SONG, Y. The development of a layer based machining system. *Computer-Aided Design*, 2001, vol. 33, p. 331-342.
- [CHE02] CHEN, L., PU, J., WANG, X. A general model for machinable features and its application to machinability evaluation of mechanical parts. *Computer-Aided Design*, 2002, vol. 34, p. 239-249.
- [CHE03] CHEN, Y.M., WEN, C.C., HO, C.T. Extraction of geometric characteristics for manufacturability assessment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2003, vol. 19, p. 371-385.
- [CHE07] CHEN, K.Z., FENG, X.F., WANG, F. A virtual manufacturing system for components made of a multiphase perfect material. *Computer-Aided Design*, 2007, vol. 39, p. 112-124.
- [CHE98] CHEOK, B.T., NEE, A.Y.C. Trends and developments in the automation of design and manufacture of tools for metal stampings. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, vol. 75, p. 240-252.
- [CHE99] CHEN, Y.M., LIU, J.J. Cost-effective design for injection molding. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1999, vol. 15, p. 1-21.
- [CHO03] CHOI, B.K., KO, K. C-space based CAPP algorithm for freeform die-cavity machining. *Computer-Aided Design*, 2003, vol. 35, p. 179-189.
- [CHO04] CHOI, S.H., CHAN, A.M.M. A virtual prototyping system for rapid product development. *Computer-Aided Design*, 2004, vol. 36, p. 401-412.
- [CHO97] CHOI, B.K., KIM, B.H. Die-cavity pocketing via cutting simulation. *Computer-Aided Design*, 1997, vol. 29/12, p. 837-846.
- [CHO99] CHOI, B.K., KIM, D.H., JERARD, R.B. C-space approach to tool-path generation for die and mould machining. *Computer-Aided Design*, 1999, vol. 29/9, p. 657-669.
- [CIR] Site internet du CIRTES. Disponible sur <http://www.cirtes.com/>, consulté le 01/09/09.
- [COL03] COLDWELL, H., WOODS, R., PAUL, M. et al. Rapid machining of hardened AISI H13 and D2 moulds, dies and press tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 135, p. 301-311.
- [COM07] Commission des communautés européennes. Proposition de règlement du parlement européen et du conseil relatif à la réception des véhicules à moteur et des moteurs au regard des émissions des véhicules utilitaires lourds (Euro VI) et à l'accès aux informations sur la répartition et l'entretien des véhicules. 2007, 25 p.
- [CON02] CONTRI, A. Qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2002, 125 p.
- [COO92] COOPER, W.W., SINHA, K.K., SULLIVAN, R.S. Measuring complexity in high-technology manufacturing: Indexes for evaluation. *Interfaces*, 1992, vol. 22/4, p. 38-48.
- [COS06] COSTA SANTOS, E., SHIOMI, M., OSAKADA, K. et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, vol. 46, p. 1459-1468.

- [CUL07] CULLER, D.E., BURD, W. A framework for extending computer aided process planning to include business activities and computer aided design and manufacturing (CAD/CAM) data retrieval. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, vol. 23, p. 339-350.
- [DAN08] DANJOU, S. KOEHLER, P. Bridging the gap between CAD and rapid technologies - Exigency of standardized data exchange. *12^{ème} Assises Européennes du Prototypage Rapide*, Paris (France), 2008, 10 p.
- [DAS96] DAS, D. GUPTA, S.K., NAU, D.S. Generating redesign suggestions to reduce setup cost: a step towards automated redesign. *Computer-Aided Design*, 1996, vol. 28/10, p. 763-782.
- [DIM07] DIMITROV, D., SCHREVE, K., TAYLOR, A. et al. Rapid prototyping driven design and realisation of large components. *Rapid Prototyping Journal*, 2007, vol. 13/2, p.85-91.
- [DIN04a] DING, Y., LAN, H., HONG, J. et al. An integrated manufacturing system for rapid tooling based on rapid prototyping. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2004, vol. 20, p. 281-288.
- [DIN04b] DING, S., MANNA, M.A., POO, A.N. Oriented bounding box and octree based global interference detection in 5-axis machining of free-form surfaces. *Computer-Aided Design*, 2004, vol. 36, p. 1281-1294.
- [DIS96] DISSINGER, T.E., MAGRAB, E.B. Geometric reasoning for manufacturability evaluation - Application to powder metallurgy. *Computer-Aided Design*, 1996, vol. 28/10, p. 783-794.
- [DIS97] DI STEFANO, P. Automatic extraction of form features for casting. *Computer-Aided Design*, 1997, vol. 29/11, p. 761-770.
- [DON97a] DONG, J., VIJAYAN, S. Manufacturing feature determination and extraction - Part 1: optimal volume segmentation. *Computer-Aided Design*, 1997, vol. 29/6, p. 427-440.
- [DON97b] DONG, J., VIJAYAN, S. Manufacturing feature determination and extraction - Part 2: a heuristic approach. *Computer-Aided Design*, 1997, vol. 29/7, p. 475-484.
- [DUB00] DUBOIS, P. AOUSSAT, A. DUCHAMP, R. Prototypage rapide – Généralités. *Techniques de l'Ingénieur BM 7 017*, 2000, 10 p.
- [EFT09] EFTHYMIU, K., PAPAKOSTAS, N., MOURTZIS, D. Fluid dynamics analogy to manufacturing systems. *42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Grenoble (France), 2009, CD 4 p.
- [ELB98] ELBER, G., ZUSSMAN, E. Cone visibility decomposition of freeform surface. *Computer-Aided Design*, 1998, vol. 30/4, p. 315-320.
- [ELM03] ELMARAGHY, W.H., URBANIC, R.J. Modelling of manufacturing systems complexity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2003, vol. 52/1, p. 363-366.
- [ELM04] ELMARAGHY, W.H., URBANIC, R.J. Assessment of manufacturing operational complexity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2003, vol. 53/1, p. 401-406.
- [ELM05] ELMARAGHY, H.A., KUZGUNKAYA, O., URBANIC, R.J. Manufacturing systems configuration complexity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2005, vol. 54/1, p. 445-450.

- [EOS02] EOS, EOSINT M250 Xtend - Basic Training - Formation dispensée par M. Collet, Ingénieur applications industrielles chez EOS GmbH, 2002.
- [EOS06] EOS. DirectMetal and DirectSteel materials for EOSINT M 270. Material data sheet, 2006.
- [EOS07a] EOS. EOS StainlessSteel 17-4 for EOSINT M 270. Material data sheet, 2007.
- [EOS07b] EOS. Liste de prix matériaux. 2007.
- [ESC96] ESCHE, S.K., KHAMITKAR, S., KINZEL, G.L. et al. Process and die design for multi-step forming of round parts of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, vol. 59, p. 24-33.
- [ETI06] ETIENNE A., DANTAN, J.Y., SIADAT, A. et al. An improved approach for automatic process plan generation of complex borings. *Computers in Industry*, 2006, vol. 57, p. 663-675.
- [FAL96] FALLBOHMER, P., ALTAN, T., TONSHOFF, H.K. et al. Survey of the die and mold manufacturing industry - Practices in Germany, Japan and the United States. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, vol. 59, p. 158-168.
- [FEN95] FENG, C.X., KUSIAK, A. Constraint-based design of parts. *Computer-Aided Design*, 1995, vol. 27/5, p. 343-352.
- [FEN96a] FENG, C.X., KUSIAK, A., HUANG, C.C. Cost evaluation in design with form features. *Computer-Aided Design*, 1996, vol. 28/11, p. 879-885.
- [FEN96b] FENG, C.X., HUANG, C.C., KUSIAK, A. Representation of functions and features in detail design. *Computer-Aided Design*, 1996, vol. 28/12, p. 961-971.
- [FLO05] FLORES, A.J. Contribution aux méthodes de conception modulaire de produits et processus industriels. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005, 166 p.
- [FLU01] FLUTTER, A., TODD, J. A machining strategy for toolmaking. *Computer-Aided Design*, 2001, vol. 33, p. 1009-1022.
- [FRA08] FRANK, M.C., HUNT, C.V., ANDERSON, D.D. Rapid manufacturing in biomedical materials: Using subtractive rapid prototyping for bone replacement. *19th Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin (USA), 2008, p. 686-696.
- [FRI97] FRITSCHKE, K., GLATTHOR, N. HSC-Fräsen im Formenbau: Rationalisierung durch Komplettbearbeitung auf Bearbeitungszentren. Verl. Moderne Industrie, 1997.
- [GAM90] Groupe GAMA. La gamme automatique en usinage. Hermes, 1990
- [GAR82] GARGANTINI, I. Linear Octtrees for fast processing of three-dimensional objects. *Computer Graphics and Image Processing*, 1982, vol. 20, p. 365-374.
- [GAY99] GAYRETLI, A., ABDALLA, H.S. A feature-based prototype system for the evaluation and optimisation of manufacturing processes. *Computers & Industrial Engineering*, 1999, vol. 37, p. 481-484.
- [GEI96] GEIGER, T.S., DILTS, D.M. Automated design-to-cost: integrating costing into the design decision. *Computer-Aided Design*, 1996, vol. 28/6-7, p. 423-438.
- [GIB07] GIBSON, I., SAVALANI, M.M., TARIK, A. et al. The use of multiple materials in rapid prototyping. *3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria (Portugal), 2007, p. 51-56.

- [GIL06] GILLOT, F. Méthodologie de conception et de fabrication d'outillages prototypes hybrides. Thèse de doctorat, Université de Nantes et École Centrale de Nantes, 2006, 206 p.
- [GOR07] GORDON, W.A., VAN TYNE, C.J., MOON, Y.H. Overview of adaptable die design for extrusions. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 187-188, p. 662-667.
- [GUI] Guide du prototypage rapide. Disponible sur <http://www.rp2community.com/>, consulté le 01/09/09.
- [GUI06] GUILHEM, J. Quel futur pour les moules ? *Machines Production*, 30 mars 2006, vol. 830
- [GUP95] GUPTA, S.K., NAU, D.S. Systematic approach to analysing the manufacturability of machined parts. *Computer-Aided Design*, 1995, vol. 27/5, p. 323-342.
- [GUP97] GUPTA, S.K., DAS, D., REGLI, W.C. et al. Automated manufacturability analysis: A survey. *Research in Engineering Design*, 1997, vol. 9/3, p. 168-190.
- [HAA02] HAAS, E., SCHWARTZ, R.C., PAPZIAN, J.M. Design and test of a reconfigurable forming die. *Journal of Manufacturing Processes*, 2002, vol. 4/1, p. 77-85.
- [HAS06a] HASCOET, J.Y., MOGNOL, P., RIVETTE, M. et al. STEP-NC applications for rapid prototyping. *49th ISO TC184/SC4 meeting, Future of Step for manufacturing activities*, Toulouse (France), 2006.
- [HAS06b] HASCOET, J.Y., MOGNOL, P., RIVETTE, M. et al. STEP-NC applications for rapid prototyping. *50th ISO TC184/SC4 meeting, Future of Step for manufacturing activities*, Hershey (USA), 2006.
- [HEO06] HEO, E.Y., KIM, D.W., KIM, B.H. et al. Estimation of NC machining time using NC block distribution for sculptured surface machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006, vol. 22, p. 437-446.
- [HIN00] HINDMAN, C., OUSTERHOUT, K.B. Developing a flexible sheet forming system. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 99, p. 38-48.
- [HMI06] H'MIDA, F., MARTIN, P., VERNADAT, F. Cost estimation in mechanical production: The Cost Entity approach applied to integrated product engineering. *Internation Journal of Production Economics*, 2006, vol. 103, p. 17-35.
- [HON03] HONGJUN, L., ZITIAN, F., NAIYU, H. et al. A note on rapid manufacturing process of metallic parts based on SLS plastic prototype. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 142, p. 710-713.
- [HOU07] HOUTMANN, Y. Décomposition avancée de modèles numériques CAO pour le procédé de Stratoconception, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy I, 2007, 145 p.
- [HOW03] HOWARD, L., LEWIS, H. The development of a database system to optimise manufacturing process during design. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 134, 374-382.
- [HU08] HU, S.J., ZHU, X., WANG, H. Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, p. 45-48.

- [HUA03] HUANG, J., GUPTA, S.K., STOPPEL, K. Generating sacrificial multi-piece molds using accessibility driven spatial partitioning. *Computer-Aided Design*, 2003, vol. 35, p. 1147-1160.
- [HUA06] HUANG, Z., XIE, B., MA, L. et al. Feature conversion based on decomposition and combination of swept volumes. *Computer-Aided Design*, 2006, vol. 38, p. 857-873.
- [HUI97] HUI, K.C. Geometric aspects of the mouldability of parts. *Computer-Aided Design*, 1997, vol. 29/3, p. 197-208.
- [HUN79] HUNTER, G.M., STEIGLITZ, K. Linear transformation of pictures represented by quad trees. *Computer Graphics and Image Processing*, 1979, vol. 10, p. 289-296.
- [HUR02] HUR, J. LEE, K., ZHU-HU et al. Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition. *Computer-Aided Design*, 2002, vol.34, p. 741-754.
- [IBA95] IBAROUDENE, D. Representation and display of three-dimensional medical images using a linear octree. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 1995, vol. 19/1, p. 153-159.
- [ISO01] ISO 10303-224. Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange. Part 224: Application protocol: Mechanical product definition for process planning using machining features. Second edition 15/04/2001. 1082 p.
- [JEG03] JEGOU, L. Méthode d'aide au choix des procédés en outillage hybride. Mémoire de DEA, École Centrale de Nantes, 2003, 84 p.
- [JIA04] JIAO, J., TSENG, M.M. Customizability analysis in design for mass customization. *Computer-Aided Design*, 2004, vol. 36, p. 745-757.
- [JIA96] JIANG, Y.D. Set operations between linear octrees. *Computers & Geosciences*, 1996, vol. 22/5, p. 509-516.
- [JOL03] JOLGAF, M., HAMOUDA, A.L.S., SULAIMAN, S. et al. Development of a CAD/CAM system for the closed-die forging process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 138, p. 436-442.
- [JUA95] JUAN-ARINYO, R., SOLE, J. Constructing face octrees from voxel-based volume representations. *Computer-Aided Design*, 1995, vol. 27/10, p. 783-791.
- [KAI01] KAILASH, S.B., ZHANG, Y.F., FUH, J.Y.H. A volume decomposition approach to machining feature extraction of casting and forging components. *Computer-Aided Design*, 2001, vol. 33, p. 605-617.
- [KAM96] KAMRANI, A.K. An integrated knowledge-based system for product design feasibility and manufacturability analysis. *Computers & Industrial Engineering*, 1996, vol. 31/1-2, p. 83-86.
- [KAR07] KARUNAKARAN, K.P., SURYAKUMAR, S., BERNARD, A. Rapid manufacturing of metallic objects: Process comparison. *3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria (Portugal), 2007, p. 7-13.
- [KEC03] KECELJ, B., KOPAC, J., KAMPUS, Z. et al. Specificity of HSC in manufacturing of forging dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 157-158, p. 536-542.

- [KEL05] KELKAR, A., NAGI, R., KOC, B. Geometric algorithms for rapidly reconfigurable mold manufacturing of free-form objects. *Computer-Aided Design*, 2005, vol. 37, p. 1-16.
- [KER04] KERSCHBAUMER, M., ERNST, G. Hybrid manufacturing process for rapid high performance tooling combining high speed milling and laser cladding. 23rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, San Francisco (USA), 2004, 10 p.
- [KER06] KERBRAT, O. Méthode de conception et de fabrication d'outillage rapide modulaire en UGV. Mémoire de Master recherche, École Centrale de Nantes, 2006, 96 p.
- [KER07a] KERBRAT, O., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. Manufacturing criteria in hybrid modular tools: how to combine additive and subtractive processes. 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria (Portugal), 2007, p. 419-424.
- [KER07b] KERBRAT, O., KERNINON, J., MOGNOL, P. et al. Fabrication d'outillages hybrides modulaires. 1^{er} séminaire EMOA, Rennes (France), 2007.
- [KER08a] KERBRAT, O., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. Manufacturing complexity evaluation for additive and subtractive processes: Application to hybrid modular tooling. 19th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (USA), 2008, p. 519-530.
- [KER08b] KERNINON, J., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. et al. Effect of path strategies on metallic parts manufactured by additive process. 19th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (USA), 2008, p. 352-361.
- [KER09a] KERBRAT, O., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. Manufacturing complexity evaluation at the design stage for both machining and layered manufacturing. 42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems, Grenoble (France), 2009, CD 7 p.
- [KER09b] KERBRAT, O., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. Méthode de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication. 11^{ème} Colloque National AIP Primeca, La Plagne (France), 2009, USB, 13 p.
- [KER09c] KERBRAT, O., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. Manufacturability analysis for hybrid modular tool. *Rapid Prototyping Journal*, accepté le 12 mai 2009.
- [KER09d] KERNINON, J., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. Global approach to design and manufacture directs parts. 4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria (Portugal), 2009, 6 p.
- [KER09e] KERBRAT, O., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. Outillages modulaires. 4^{ème} séminaire EMOA, Rungis (France), 2009.
- [KI02] KI, D., LEE, K. Part decomposition for die pattern machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 130-131, p. 599-607.
- [KIM02] KIM, Y.S., WANG, E. Recognition of machining features for cast then machined parts. *Computer-Aided Design*, 2002, vol. 34, p. 71-87.
- [KIM06] KIM, Y.H., KO, S.L. Improvement of cutting simulation using the octree model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 28, p. 1152-1160.
- [KIM98] KIM, J. NC verification using octree. Master of Science in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1998, 69 p.

- [KIN03] KING, D., TANSEY, T. Rapid tooling: selective laser sintering injection tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 132, p. 42-48.
- [KLI76] KLINGER, A., DYER, C.R. Experiments on picture representation using regular decomposition. *Computer Graphics and Image Processing*, 1976, vol. 5, p. 68-105.
- [KOR05] KOROSEC, M., BALIC, J., KOPAC, J. Neural network based manufacturability evaluation of free form machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, vol. 45, p. 13-20.
- [KRA04] KRAJNIK, P., KOPAC, J. Modern machining of die and mold tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 157-158, p. 543-552.
- [KRU05] KRUTH, J.P., VANDENBROUCKE, B., VAN VAERENBERGH, J. et al. Benchmarking of different SLS/SM processes as rapid manufacturing techniques. *International Conference on Polymers & Mould Innovations (PMI)*, Gent (Belgique), 2005.
- [KRY80] KRYPIANOU, L.K. Shape classification in computer aided design. Ph.D. Thesis, 1980.
- [KUM97] KUMAR, V., DUTTA, D. An assessment of data formats for layered manufacturing. *Advances in Engineering Software*, 1997, vol. 28, p. 151-164.
- [KUZ04] KUZMAN, K., NARDIN, B. Determination of manufacturing technologies in mould manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 157-158, p. 573-577.
- [LAM97] LAM, T.W., YU, K.M., CHEUNG, K.M. et al. Octree reinforced thin shell objects rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 63, p. 784-787.
- [LAM98] LAM, T.W., YU, K.M., CHEUNG, K.M. et al. Octree reinforced thin shell objects rapid prototyping by fused deposition modelling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1998, vol. 14, p. 631-636.
- [LAP97] LAPP, C.W., GOLAY, M.W. Modular design and construction techniques for nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 1997, vol. 172, p. 327-349.
- [LEE98] LEE, R.S., CHEN, Y.M., CHENG, H.Y. et al. A framework of a concurrent process planning system for mold manufacturing. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1998, vol. 11/3, p. 171-190.
- [LEF05] LEFEBVRE, S. Modèles d'habillage de surface pour la synthèse d'images. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble, 2005, 242 p.
- [LEG95] LEGOFF, O. Extraction d'attributs et réseaux neuronaux en programmation hors-ligne de robots de soudage. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1995, 170 p.
- [LEM77] LE MOIGNE, J.L. La théorie du système général - Théorie de la modélisation. Presses Universitaires de France, 1977, réédité en 2006 sous forme d'e-book, disponible sur <http://www.mcxapc.org/inserts/ouvrages/0609tshtm.pdf>, consulté le 01/09/09.
- [LEP03] LE PICART, D. Impact environnemental en prototypage rapide. Mémoire de DEA, Université de Nantes, 2003, 63 p.
- [LES04a] LESPRIER, T., MOGNOL, P. FURET, B. et al. Hybrid manufacturing for prototypes and dies. *Machine Engineering*, 2004, vol. 4/1-2, p. 201-210.
- [LES04b] LESPRIER, T., MOGNOL, P. FURET, B. et al. A new method of prototypes and dies manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2004, vol. 218/10, p. 1423-1428.

- [LES05] LESPRIER T., Conception et fabrication de prototypes modulaires à fonctionnalités évolutives. Thèse de doctorat, Université de Nantes et École Centrale de Nantes, 2005, 219 p.
- [LEV03] LEVY, G., SCHINDEL, R., KRUTH, J.P. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2003, vol. 52/2, p. 589-609.
- [LEV04] LEVY, F. Complexité grammatologique et complexité aperceptive en musique. Thèse de Doctorat, École des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 2003, 387 p.
- [LEW00] LEWIS, G.K., SCHLIENGER, E. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. *Materials and Design*, 2000, vol. 21, p. 417-423.
- [LI02] LI, B., LIU, J. Detail feature recognition and decomposition in solid model. *Computer-Aided Design*, 2002, vol. 34, p. 405-414.
- [LI99] LI, M., LIU, Y., SU, S. et al. Multi-point forming: a flexible manufacturing method for 3-d surface sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, vol. 87, p. 277-280.
- [LIU96] LIU, C., ESTERLING, M. FONTDECABA, J. Dimensional verification of NC machining profiles using extended quadtree. *Computer-Aided Design*, 1996, vol. 28/11, p. 845-852.
- [LOU04] LOUKIL, R., MAHE, T., GUEZEL, J.C. et al. Dossier environnement - Ecoconception - Faites-en un levier pour l'innovation. *Industrie et Technologies*, février 2004, vol. 855.
- [MA04] MA, W., BUT, W.C., HE, P. NURBS-based adaptive slicing for efficient rapid prototyping. *Computer-Aided Design*, 2004, vol. 36, p. 1309-1325.
- [MA08] MA, Y., FUH, J.Y.H. Product lifecycle modelling, analysis and management. *Computers in Industry*, 2008, vol. 59, p. 107-109.
- [MAR00a] MAROPOULOS, P.G., BAKER, R.P., PARMAOR, K.Y.G. Integration of tool selection with design. Part 2: Aggregate machining time estimation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 107, p. 135-142.
- [MAR00b] MAROPOULOS, P.G., BAKER, R.P. Integration of tool selection with design. Part 1: Feature creation and selection of operations and tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 107, p. 127-134.
- [MAR02] MARI, J.L. Modélisation de formes complexes intégrant leurs caractéristiques globales et leurs spécificités locales. Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, 2002, 238 p.
- [MAS02] MASOOD, S.H., SOO, A. A rule-based expert system for rapid prototyping system selection. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2002, vol. 18/3-4, p. 267-274.
- [MEA82] MEAGHER, D. Geometric modeling using octree encoding. *Computer graphics and image processing*, 1982, vol. 19, p. 129-147.
- [MED06] MEDELLIN, H., CORNEY, J., DAVIES, J.B.C. et al. Algorithms for the physical rendering and assembly of octree models. *Computer-Aided Design*, 2006, vol. 38, p. 69-85.

-
- [MOG05a] MOGNOL, P. Réalisation de pièces unitaires et petites séries - De l'utilisation performante et raisonnée des process de production. Habilitation à Diriger des recherches, Université de Nantes, 2005, 125 p.
- [MOG05b] MOGNOL, P., PERRY, N., LE PICART, D. Environmental aspect of rapid prototyping: Process energy consumption. *12th CIRP Life Cycle Engineering*, Grenoble (France), 2005, 6 p.
- [MOG06a] MOGNOL, P., LE PICART, D., PERRY, N. Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight. *Rapid Prototyping Journal*, 2006, vol. 12/1, p. 26-37.
- [MOG06b] MOGNOL, P., JEGOU, L. RIVETTE, M. et al. High Speed Milling, Electro Discharge Machining and Direct Metal Laser Sintering: A method to optimize these processes in hybrid rapid tooling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 29/1-2, p. 35-40.
- [MOG07] MOGNOL, P., RIVETTE, M., JEGOU, L. et al. A first approach to choose between HSM, EDM and DMLS processes in hybrid rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 2007, vol. 13/1, p. 7-16.
- [MOL08] MOLCHO, G., ZIPORI, Y., SCHNEOR, R. et al. Computer aided manufacturability analysis: Closing the knowledge gap between the designer and the manufacturer. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, p. 153-158.
- [MON03] MONREAL, M., RODRIGUEZ, C.A. Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling. *Computer-Aided Design*, 2003, vol. 35, p. 395-401.
- [MOR86] MORIN, E. La Méthode, Tome III. La connaissance de la connaissance. Le Seuil, 1986.
- [MUK97] MUKHERJEE, A., LIU, C.R. Conceptual design, manufacturability evaluation and preliminary process planning using function-form relationships in stamped metal parts. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, 1997, vol. 13/3, p. 253-270.
- [NAG08] NAGAHANUMAIAH, SUBBRAJ, K., RAVI, B. Computer aided rapid tooling process selection and manufacturability evaluation for injection mold development. *Computers in Industry*, 2008, vol. 59, p. 262-276.
- [NAK00] NAKAGAWA, T. Advances in prototype and low volume sheet forming and tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 98, p. 244-250.
- [NAS07] NASEREDDIN, M., MULLENS, M.A., COPE, D. Automated simulator development: A strategy for modeling modular housing production. *Automation in Construction*, 2007, vol. 16, p. 212-223
- [NEW08] NEWMAN, S.T., NASSEHI, A., XU, X.W. et al. Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC technology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008, vol. 24, p. 699-708.
- [NOB05] NOBLET, V. Trumpf laser forming. *11^{ème} Assises Européennes du Prototypage Rapide*, Paris (France), 2005.
- [ONG03] ONG, S.K., SUN, M.J., NEE, A.Y.C. A fuzzy set AHP-based DFM tool for rotational parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 138, p. 223-230.
- [OST02] OSTY, G. Extraction de particularités sur données discrètes issues de numérisation 3D. Partitionnement de grands nuages de points. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2002.
-

- [PAL07] PAL, D.K., RAYGHAUDHURI, T.K., SUBBURAJ, K. Rapid tooling route selection and evaluation for sand and investment casting. *3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria (Portugal), 2007, p. 455-462.
- [PAR98] PARK, S.B., CHOI, Y., KING, B.M. et al. A study of computer-aided process design systems for axisymmetric deep-drawing products. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, vol. 75, p. 17-26.
- [PAU96] PAUL, B.K., BASKARAN, S. Issues in fabricating manufacturing tooling using powder-based additive freeform fabrication. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, vol. 61, p. 168-172.
- [PEP98] PEPELNJAK, T., KUZMAN, K. Adaptable tooling sets for metal forming of geometrically similar products. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, vol. 80-81, p. 413-420.
- [PER40] PERERA, B.V. US Patent 2,189,592, 1940.
- [PES06] PESSARD, E. Etude de l'outillage rapide (DMLS) à destination de l'outillage métallique. Mémoire de Master recherche, École Centrale de Nantes, 2006, 69 p.
- [PES08] PESSARD, E., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. et al. Complex cast parts with rapid tooling: rapid manufacturing point of view. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 39, p. 898-904.
- [PHA07] PHAM, D.T., SU, S.Z., LI, M.Z. et al. Digitally adjustable tooling technology for dieless forming and jigless assembly of panels. *3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria (Portugal), 2007, p. 403-408.
- [PRA02] PRATT, M.J., BHATT, A.D., DUTTA, D. et al. Progress towards an international standard for data transfer in rapid prototyping and layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 2002, vol. 34, p. 1111-1121.
- [PRI04] PRIYADARSHI, A.K., GUPTA, S.K. Geometric algorithms for automated design of multi-piece permanent molds. *Computer-Aided Design*, 2004, vol. 36, p. 241-260.
- [PSA07] PSA Peugeot-Citroën. Le projet EMOA Excellence dans la Maîtrise de l'Ouvrant Automobile (capot, porte, volet) - Conception innovante des ouvrants automobile. Descriptif du projet, 2007, 89 p.
- [RAG07] RAGHUNATH, N., PANDEY, P.M. Improving accuracy through shrinkage modelling by using Tagushi method in selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, vol. 47, p. 985-995.
- [RAH06] RAHMANI, K., AREZOO, B. Boundary analysis and geometric completion for recognition of interacting machining features. *Computer-Aided Design*, 2006, vol. 38, p. 845-856.
- [RAU07] RAUCH, M., HASCOET, J.Y. Rough pocket milling with trochoidal and plunging strategies. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2007, vol. 2/2, p. 161-175.
- [RIS97] RISACHER, P. Choix de configuration de machine-outil pour l'usinage de surfaces complexes. Thèse de doctorat, Université de Nantes et École Centrale de Nantes, 1997.

- [RIT06] RITOU, M., GARNIER, S., FURET, B. A new versatile in-process monitoring system for milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, vol. 46, p. 2026-2035.
- [RIV06] RIVETTE, M., MOGNOL, P., HASCOET, J.Y. Approach tolerance in the assemblies of evolutionary hybrid prototypes. 17th *Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin (USA), 2006, p. 573-585.
- [RIV07a] RIVETTE, M., RAUCH, M., HASCOET, J.Y. et al. STEP-NC applications for rapid prototyping. 51st *ISO TC184/SC4 meeting, Future of Step for manufacturing activities*, Funchal (Portugal), 2006.
- [RIV07b] RIVETTE, M. Méthodologie d'obtention d'outillage rapide par l'assemblage de composants élémentaires hybrides. Thèse de doctorat, Université de Nantes et École Centrale de Nantes, 2007, 246 p.
- [RIV07c] RIVETTE, M., HASCOET, J.Y., MOGNOL, P. A graph-based methodology for hybrid rapid design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 2007, vol. 221/4, p. 685-697.
- [ROB97] ROBERTS, C., HUBELE, N., HENDERSON, M. et al. Manufacturing evaluation using resource-based, template-free features. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1997, vol. 8/4, p. 323-331.
- [ROC00] ROSOCHOWSKI, A., MATUSZAK, A. Rapid tooling: the state of the art. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 106, 191-198.
- [ROD04] RODRIGUEZ, C.A., CORTES, J. AHUETT, H. et al. Evaluation of hard milling and wire electro-discharge machining on hardened D2 steel - process economics and workpiece surface integrity. *International Manufacturing Technology Show, Manufacturing Conference*, Chicago (USA), 2004, p. 1-7.
- [ROY98] ROY, U., XU, Y. 3-D object decomposition with extended octree model and its application in geometric simulation of NC machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1998, vol. 14, p. 317-327.
- [ROY99] ROY, U., XU, Y. Computation of a geometric model of a machined part from its NC machining programs. *Computer-Aided Design*, 1999, vol. 31, p. 404-411.
- [RUA06] RUAN, J., SPARKS, T.E., FAN, Z. et al. A review of layer based manufacturing processes for metals. 17th *Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin (USA), 2006, p. 233-245.
- [RUB06] RUBIO PARAMIO, M.A., PEREZ GARCIA, J.M., RIOS CHUECO, J. et al. A procedure for plastic parts demoldability analysis. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006, vol. 22, p. 81-92.
- [SAB02] SABOURIN, L., LEFEBVRE, A., RENAUD, J. et al. Capitalisation et formalisation de savoir-faire pour la conception de gammes d'usinage série. *Mécaniques & Industries*, 2002, vol. 3, p. 121-128.
- [SAI07] SAIFULLAH, A.B.M., MASOOD, S.H. Finite element thermal analysis of conformal cooling channels in injection moulding. 5th *Australasian Congress on Applied Mechanics*, Brisbane (Australie), 2007, p. 337-341.

- [SAL08] SALHIEH, S.M. Developing manufacturing response models to predict the manufacturability of new modular products. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 39, p. 599-611.
- [SAN97] SANCHEZ, J.M., PRIEST, J.W., SOTO, R. Intelligent reasoning assistant for incorporating manufacturability issues into the design process. *Experts Systems with Applications*, 1997, vol. 12/1, p. 81-88.
- [SCH06] SCHUTZER, K., HELLENO, A.L., PEREIRA, S.C. The influence of the manufacturing strategy on the production of molds and dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 179, p. 172-177.
- [SHA95] SHAH, J.J., MANTYLA, M. Parametric and feature-based CAD/CAM. Wiley Interscience, New York, 1995.
- [SHE01] SHEBAB, E.M., ABDALLA, H.S. Manufacturing cost modelling for concurrent product development. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2001, vol. 17, p. 341-353.
- [SHI03] SHIN, H., OLLING, G.J., CHUNG, Y.C. et al. An integrated CAPP/CAM system for stamping die pattern machining. *Computer-Aided Design*, 2003, vol. 35, p. 203-213.
- [SIL06] SILLER, H., RODRIGUEZ, C.A., AHUETT, H. Cycle time prediction in high-speed milling operations for sculptured surface finishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 174, p. 355-362.
- [SOS02] SOSNOWSKI, W., MARCZEWSKA, I., MARCZEWSKI, A. Sensitivity based optimisation of sheet metal forming tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 124, p. 319-328.
- [SRI01] SRIDHARAN, A.K., JOSHI, S. An octree-based algorithm for the optimization of extraneous material removal in laminated object manufacturing (LOM). *Journal of Manufacturing Systems*, 2001, vol. 19/6, p. 355-364.
- [STA99] STAGE, R., ROBERTS, C., HENDERSON, M. Generating resource based flexible form manufacturing features through objective driven clustering. *Computer-Aided Design*, 1999, vol. 31, p.119-130.
- [SUH03] SUH, S.H., LEE, B.E., CHUNG, D.H. et al. Architecture and implementation of a shop-floor programming system for Step-compliant CNC. *Computer-Aided Design*, 2003, vol. 35, p. 1069-1083.
- [SUH05] SUH, N.P. Complexity in engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2005, vol. 54/2, p. 46-63.
- [SUN01] SUN, G., SEQUIN, H., WRIGHT, P.K. Operation decomposition for freeform surface features in process planning. *Computer-Aided Design*, 2001, vol. 33, p. 621-636.
- [TAI98] TAILLANDIER, G. BERNARD, A. Le prototypage rapide. Hermes, 1998.
- [TAP07a] TAPIE, L., MAWUSSI, K.B., ANSELMETTI, B. Décomposition topologique du modèle de conception des outillages de forge pour la génération de trajectoires UGV. *10^{ème} colloque national AIP Primeca*, La Plagne (France), 2007, 12 p.
- [TAP07b] TAPIE, L. Décomposition topologique des outillages de forge pour la génération de trajectoires UGV. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2007, 187 p.

- [TAP08] TAPIE, L., MAWUSSI, K.B. Analyses de difficultés d'usinage pour les pièces de formes complexes : concept de viewer. *5^{ème} Assises Machines et Usinage à Grande Vitesse*, Nantes (France), 2008, USB 11 p.
- [TAT98] TATA, K., FADEL, G., BAGCHI, A. et al. Efficient slicing for layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 1998, vol. 4/4, p. 151-167.
- [TER05] TERRIER, M. Optimisation du processus de fabrication en usinage à grande vitesse sur machines-outils à structure parallèle. Thèse de Doctorat École Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2005, 238 p.
- [TIC04] TICHADOU, S. LEGOFF, O., HASCOET, J.Y. A 3D model for manufacturing precision analysis. *Machine Engineering*, 2004, vol.4/1, p. 116-126.
- [TRA] TRAMETAL. Avec l'UGV : pour les moules, revoir la technique de fabrication. *Spécial « Moulistes »*, mais 2004. Disponible sur <http://www.trametal.com/machines-outils/article-13-521-avec-l-ugv-pour-les-moules-revoir-la-technique-de-fabrication.html>, consulté le 01/09/09.
- [TSA99] TSAI, Y.T., WANG, K.S. The development of modular-based design in considering technology complexity. *European Journal of Operational Research*, 1999, vol. 119, p. 692-703.
- [TSE97] TSENG, Y.J. Fixturing design analysis for successive feature-based machining. *Computers in Industry*, 1999, vol. 38, p. 249-262.
- [UME08] UMEDA, Y., FUKUSHIGE, S., TONIOKE, K. et al. Product modularity for life cycle design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, p. 13-16.
- [URS03] URSO, D., VACHER, B., HASSANALY, P. Renouvellement des connaissances et organisation industrielle verticale : Le cas de la conception d'outillage de mise en forme. *11^{ème} rencontre internationale du Gerpisa*, Paris (France), 2003, 13 p.
- [VER09] VERQUIN, B., PILLOT, S. Du prototypage à la fabrication directe. *Lundi de la mécanique du CETIM*, Pau (France), 2009.
- [VIL03] VILLENEUVE, F. Génération automatique des processus de fabrication. *Fabrication assistée par ordinateur*, Hermes Lavoisier, 2003, p. 295-350.
- [VIV04] VIVANCOS, J., LUIS, C.J., COSTA, L. et al. Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 155-156, p. 1505-1512.
- [WAI09] WAIYAGAN, K., BOHEZ, E.L.J. Intelligent feature based process planning for five-axis mill-turn parts. *Computers in Industry*, 2009, vol. 60, p. 296-316.
- [WAN07] WANG, J., ROBERTS, C.A., DANIELSON, S. Local and global accessibility evaluation with tool geometry. *Computer-Aided Design & Applications*, 2007, vol. 4/1-4, p. 19-29.
- [WEH08] WEHBE, T., DESSEIN, G., ARNAUD, L. Etude expérimentale du comportement vibratoire d'une pièce mince en usinage. *13^{ème} séminaire Manufacturing 21*, Saint-Étienne (France), 2008.
- [WEN97] WENGER, P. CHABLAT, D. Definition sets for the direct kinematics of parallel manipulators. *8th International Conference in Advanced Robotics*, Monterey (USA), 1997, p. 859-864.

- [WEN98] WENGER, P. CHABLAT, D. Workspace and assembly modes in fully-parallel robots: a descriptive study. *Advances in Robot Kinematics and Computational Geometry*, Kluwer Academic Publishers, 1998, p. 117-126.
- [WHO07] WHOLERS, T. Wholers report 2007 - State of the Industry - Annual Worldwide Progress Report. Wholers Associates, 2007.
- [WIK] WIKIPEDIA, Article "Complexité". Disponible sur <http://fr.wikipedia.org/wiki/Complexite>, consulté le 01/09/09.
- [YAN03] YANG, S.Y., GIRIVASAN, V., SINGH, N.R. et al. Selection of optimal material and operating conditions in composite manufacturing. Part II: Complexity, representation of characteristics and decision making. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, vol. 43, p. 175-184.
- [YIN01] YIN, Z.P., DING, H., XIONG, Y.L. Virtual prototyping of mold design: geometric mouldability analysis for neat net-shape manufactured parts by feature recognition and geometric reasoning. *Computer-Aided Design*, 2001, vol. 33, p. 137-154.
- [ZAN64] ZANG, E.E., US Patent 3,137,080, 1964.

Annexe

Figures pour impressions couleurs

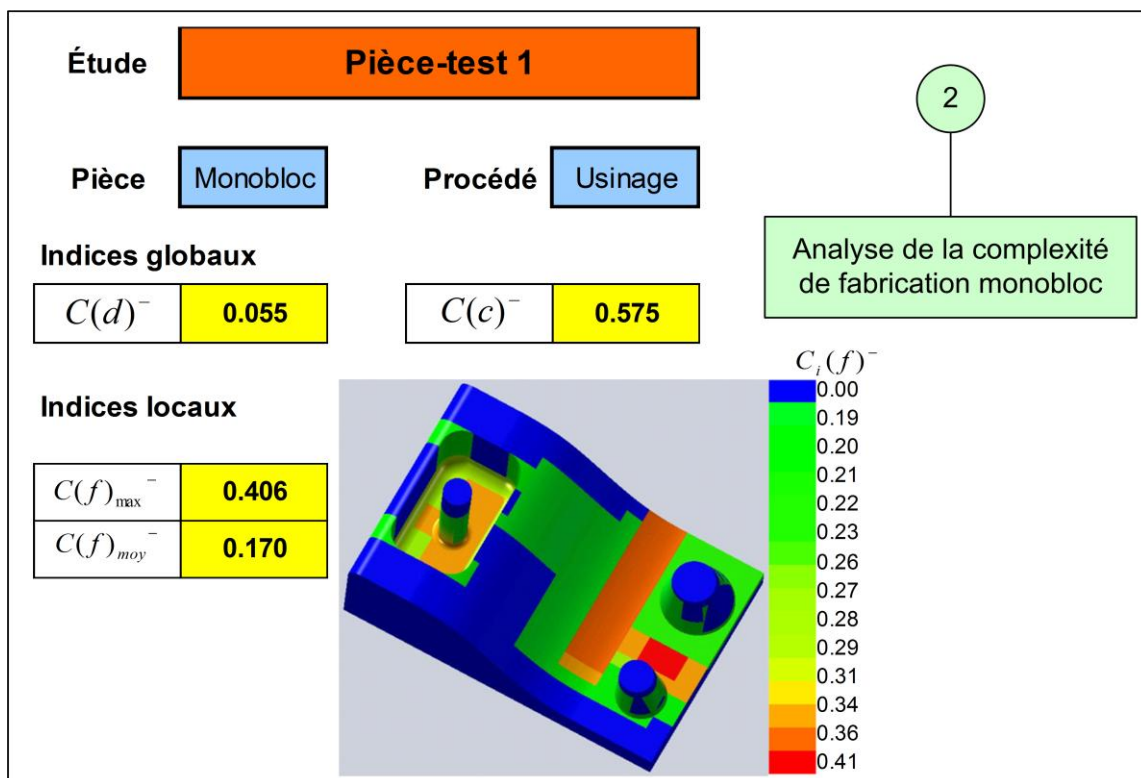


Figure 89*. Résultats pour l'analyse de complexité de fabrication par usinage pour la pièce-test.

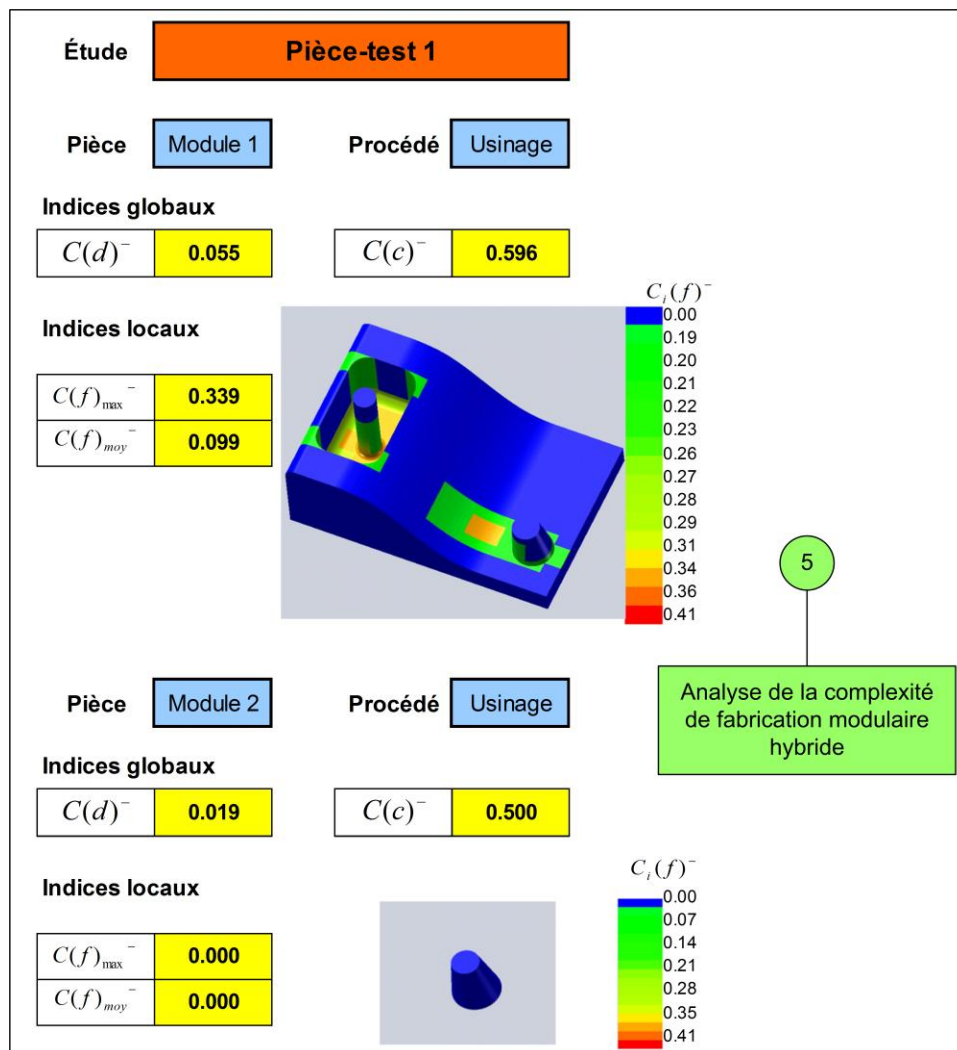


Figure 92*. Résultats de l'analyse de complexité de fabrication pour les modules.

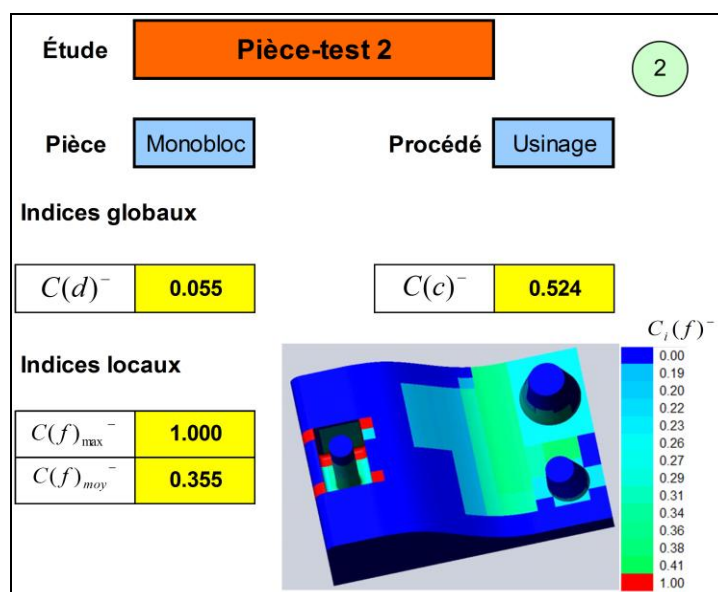


Figure 97*. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour cette seconde pièce-test.

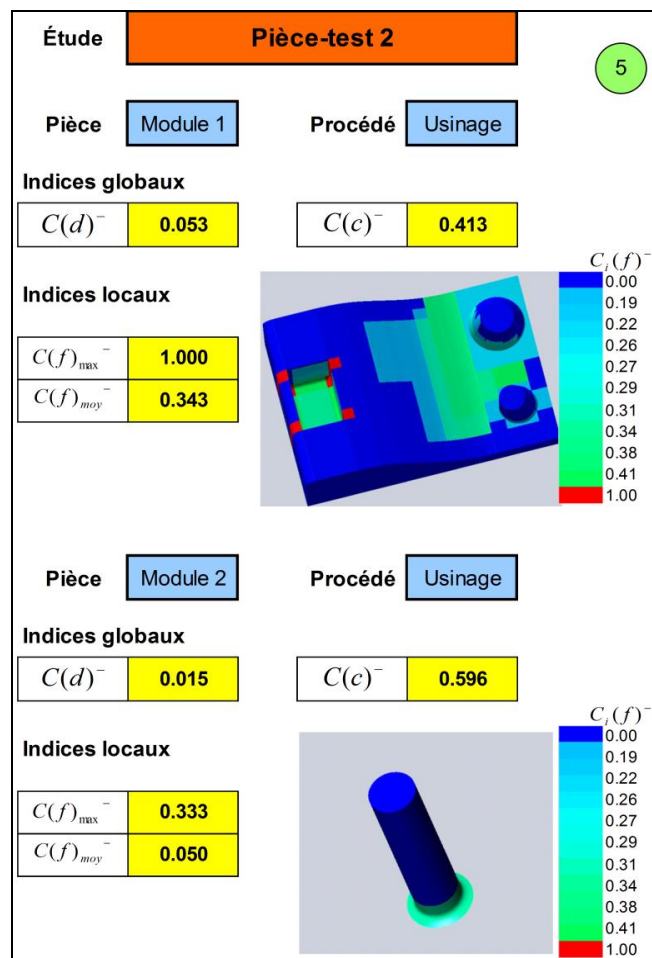


Figure 101*. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la conception modulaire de la seconde pièce-test.

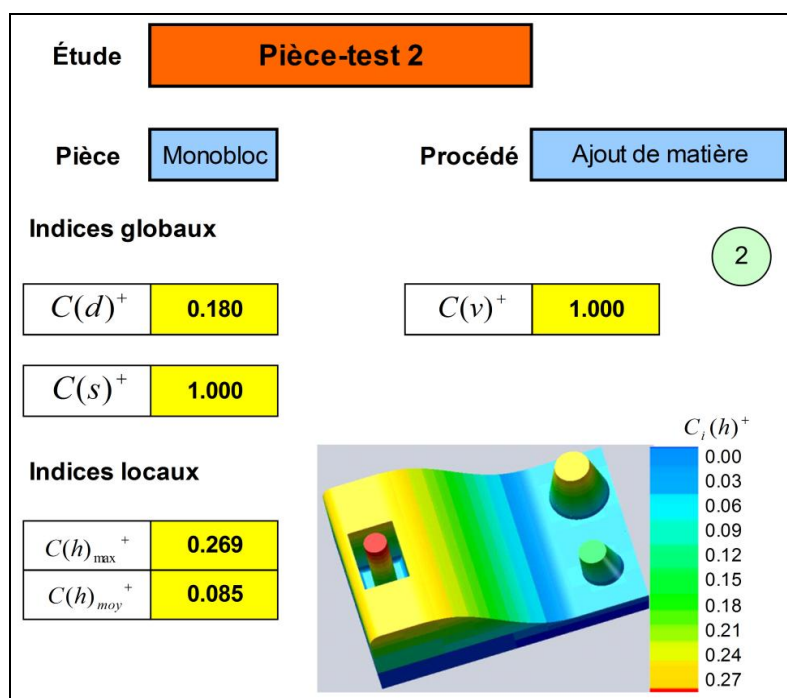


Figure 102*. Analyse de complexité de fabrication par ajout de matière pour la seconde pièce-test.

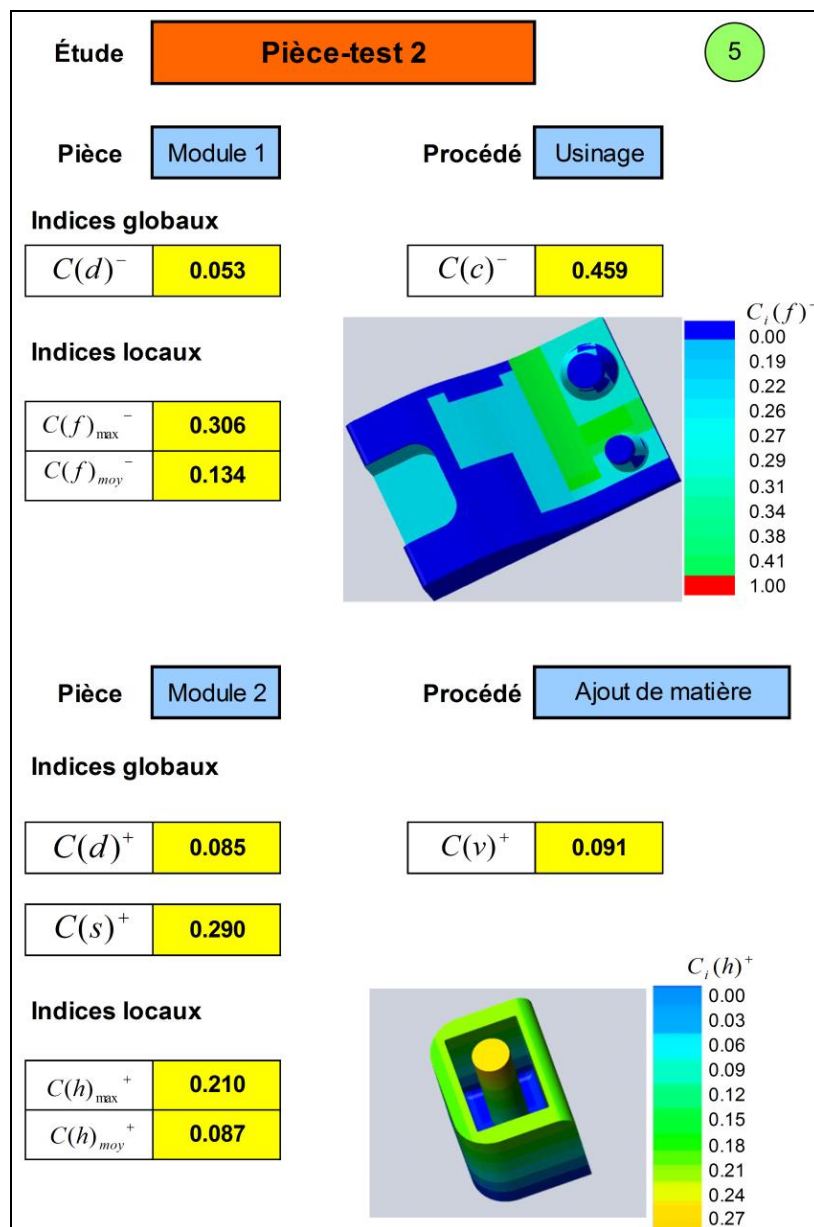


Figure 104*. Analyse de complexité de fabrication pour la seconde pièce-test conçue avec l'approche hybride.

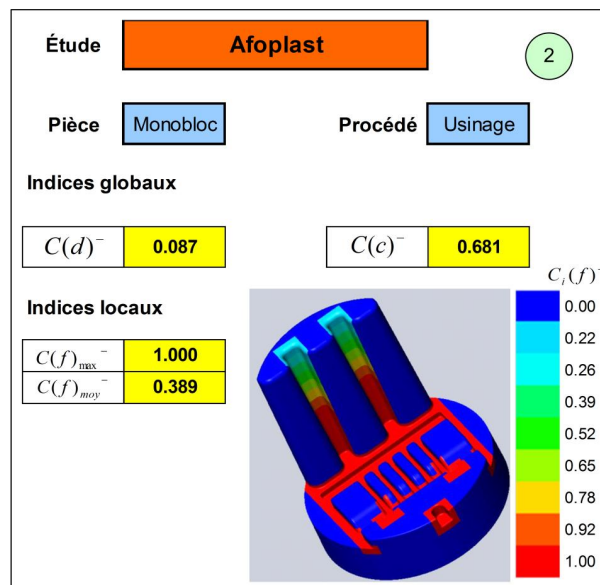


Figure 114*. Analyse de complexité de fabrication de la pièce Afoplast monobloc.

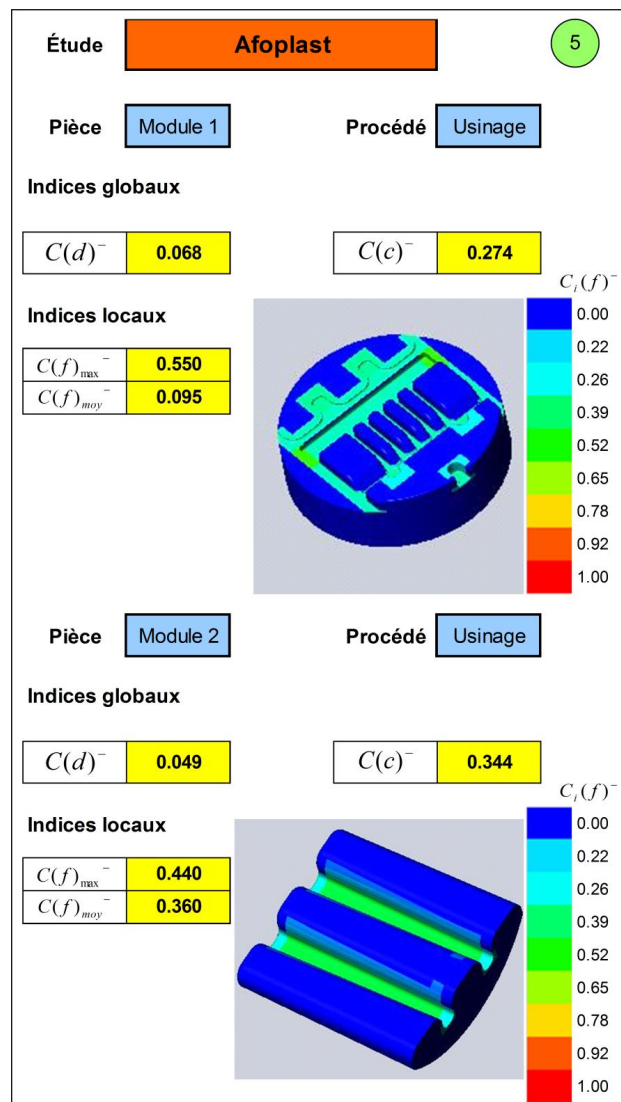


Figure 116*. Analyse de complexité de fabrication pour la pièce Afoplast modulaire.

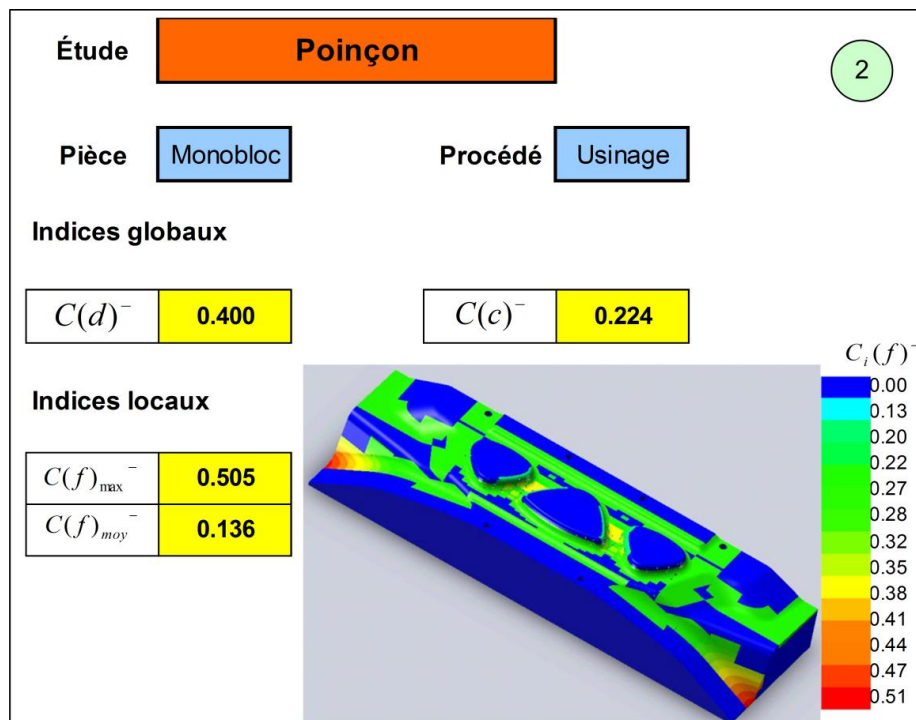


Figure 122*. Analyse de complexité de fabrication pour le poinçon monobloc.

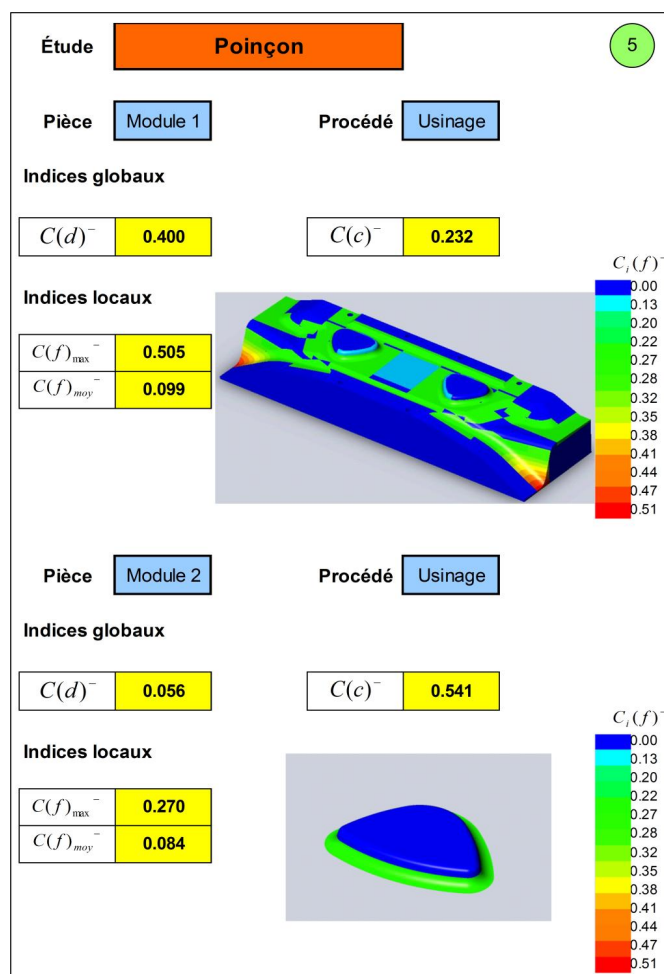


Figure 124*. Analyses de complexité de fabrication pour les modules composant le poinçon modulaire.

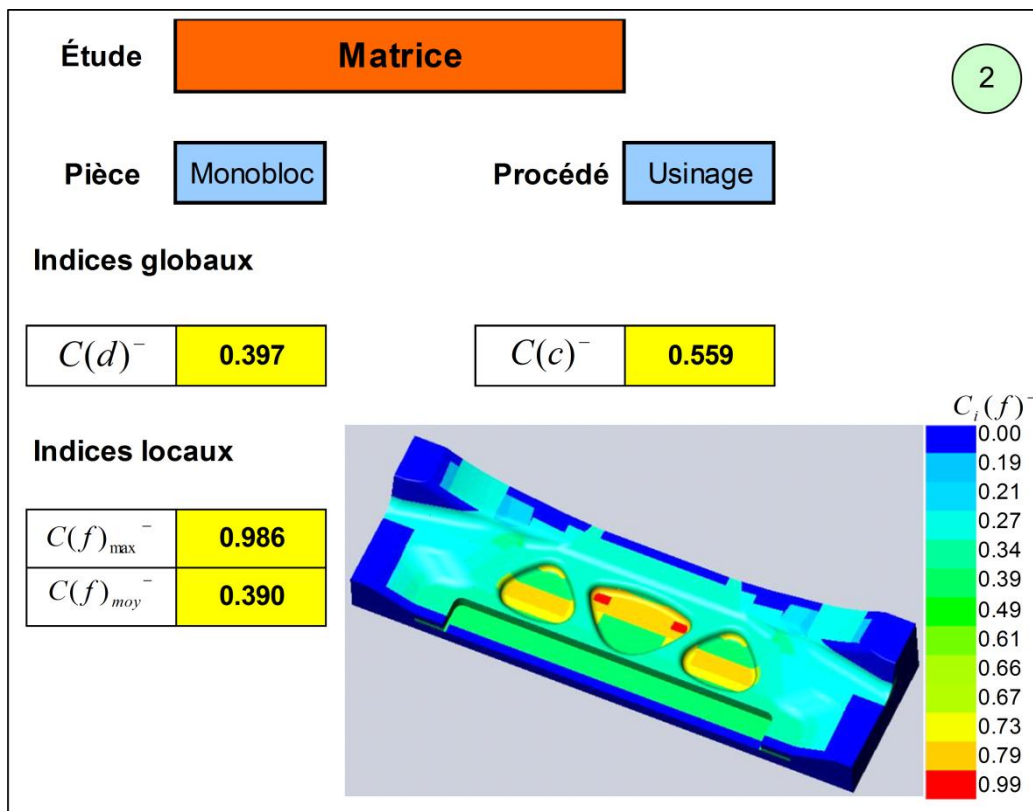


Figure 126*. Analyse de complexité de fabrication par usinage pour la matrice monobloc.

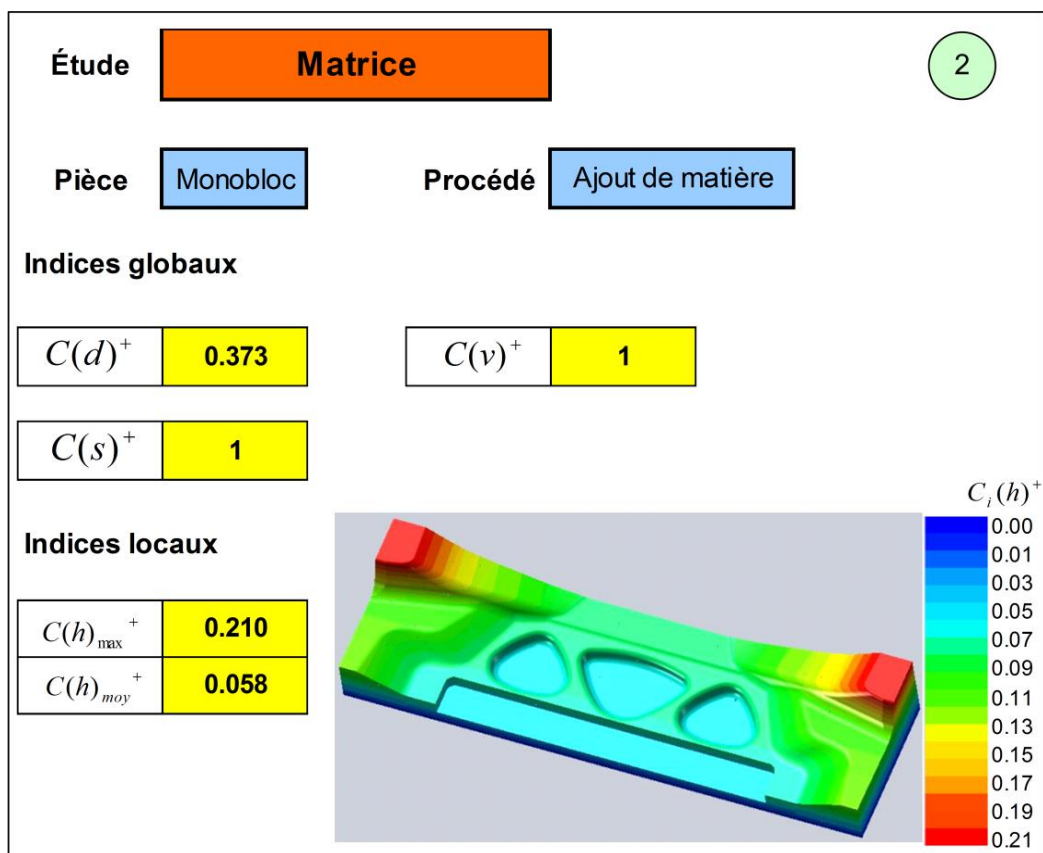


Figure 127*. Analyse de complexité de fabrication par ajout de matière pour la matrice monobloc.

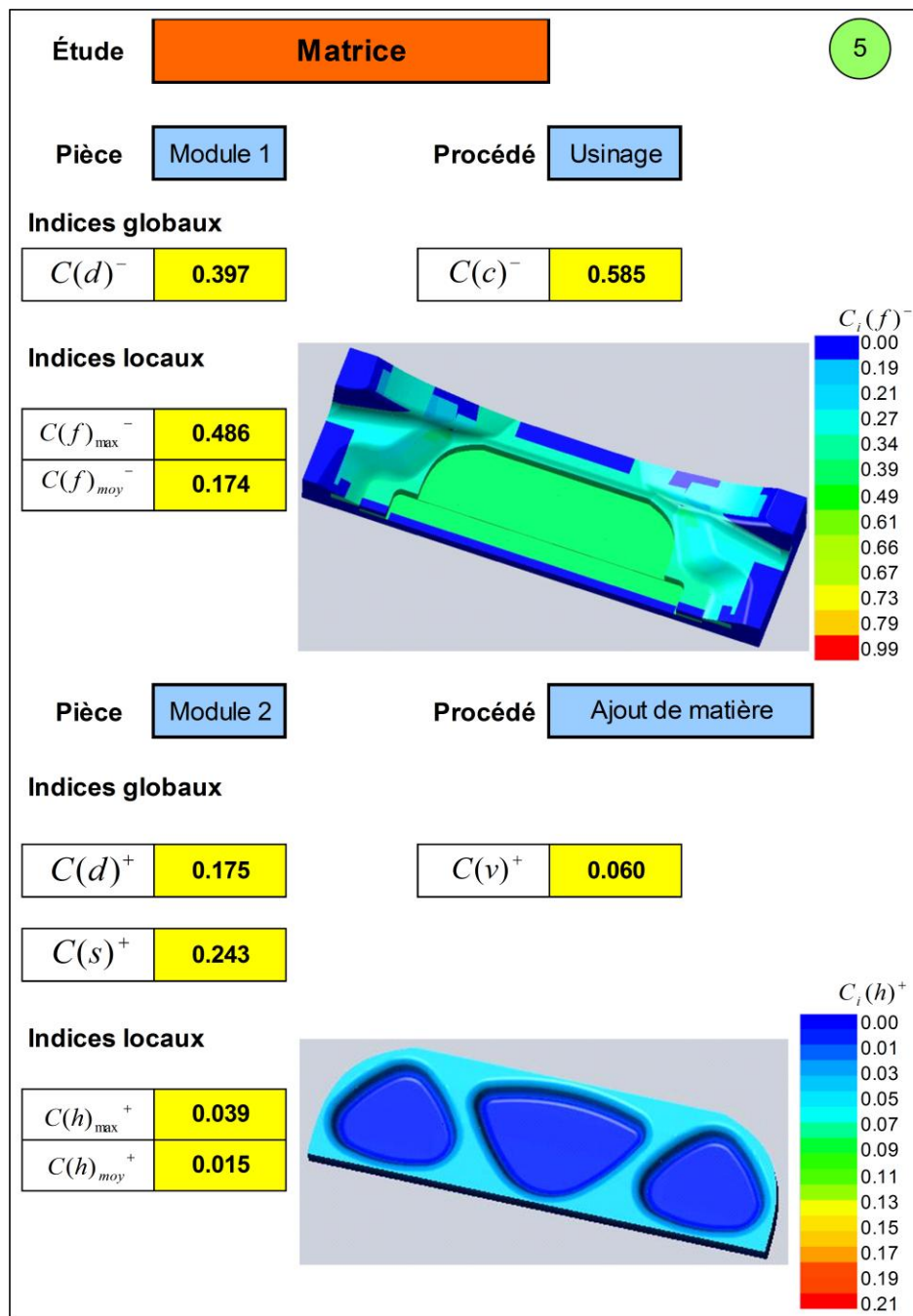


Figure 129*. Résultats des analyses de complexité de fabrication pour la conception modulaire hybride de la matrice.

Résumé en français

Dans le contexte actuel de concurrence industrielle internationale, la diversité des produits proposés et leur complexité croissante imposent aux industriels de proposer des produits manufacturés innovants, de qualité, à moindre coût et dans des délais de plus en plus contraignants. Le marché de la fabrication d'outillages de mise en forme (moules d'injection, matrices d'emboutissage, etc) a fortement évolué. Les outillages doivent désormais être conçus et mis au point plus rapidement, être adaptables aux différentes variantes de produits et fabriqués à coût maîtrisé.

Ainsi, les outillages peuvent avantageusement être conçus avec une double approche : modulaire et hybride. Les outillages sont vus non plus comme une seule pièce, mais comme un puzzle en trois dimensions, avec différents modules fabriqués séparément puis assemblés. L'approche modulaire permet de prendre en compte les différentes variantes d'une même famille de pièces à produire en facilitant un changement rapide des parties de l'outillage. L'approche hybride permet de choisir le procédé de fabrication le plus adapté pour chacun des modules de l'outillage. Nous nous sommes intéressés aux procédés d'usinage par enlèvement de matière ainsi qu'aux procédés de fabrication rapide par ajout de matière. Ces technologies additives arrivent à maturité et, bien qu'un haut niveau de qualité soit encore délicat à obtenir, les possibilités de réalisation de formes difficiles, voire impossibles, à usiner par enlèvement de matière rendent ces procédés très attractifs.

Ce travail de thèse consiste donc en l'élaboration d'une méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides. Cette méthode permet, dans un premier temps, d'analyser la complexité de fabrication des outillages lors de leur conception. Dans un deuxième temps, afin de réduire la complexité de fabrication (et par conséquent, diminuer les temps et coûts de réalisation à qualité égale), une nouvelle conception de l'outillage est proposée, en appliquant les points de vue modulaire et hybride. La complexité de fabrication de ce nouvel outillage est ensuite analysée, puis comparée à la première afin de quantifier les gains induits par notre approche modulaire hybride.

Une maquette informatique a donc été développée et implémentée dans un logiciel de CAO pour mettre en évidence les possibilités d'utilisation de la méthodologie lors de la phase de conception d'outillages. Elle est testée sur différentes pièces-test et outillages industriels, en particulier dans le cadre du projet EMOA (Excellence dans la Maîtrise de l'Ouvrant Automobile haut de gamme) piloté par PSA Peugeot-Citroën.

Mots-clés : Méthode de conception, Usinage, Fabrication rapide, Octree, Fabricabilité, Modularité

Titre et résumé en anglais

Hybrid modular tooling design methodology, based on manufacturability analysis

In order to stay competitive, manufacturers have to develop new products in a very short time and with reduced costs, whereas customers require more and more quality and flexibility. The field of tooling (dies and molds) does not break these constraints and one possibility to improve competitiveness is to design and manufacture tools with modular and hybrid points of views. Instead of a one-piece tool, it is seen as a 3-D puzzle with modules realized separately and further assembled.

With the modular point of view, every module may be produced simultaneously and few modules may be changed without changing the whole tool. In the hybrid point of view, tools are decomposed into modules which will be manufactured by the best process, in term of time, cost and quality. Presently, focus is put on comparison between a subtractive process (High-Speed Machining) and an additive process (Selective Laser Sintering). Nowadays, a number of additive fabrication technologies are used to produce metal parts and tools. These technologies provide an interesting alternative to CNC machining, especially in quickly manufacturing complex shapes.

This work concerns the development of a new hybrid modular tooling design methodology. The aim of this new methodology is to propose a hybrid modular decomposition of the tool which facilitates its manufacturing. So two points have to be taken into account: the evaluation of the manufacturability of the tool at the design stage, and a hybrid modular decomposition that can decrease the manufacturing complexity. Therefore, manufacturability indexes have been created, there are calculated and compared in order to show the improvements between the first design and the hybrid modular one.

A procedure has been developed to evaluate manufacturing complexity from a tool CAD model, with the calculation of manufacturability indexes. The work has been carried out on CAD software. The methodology is applied on industrial dies from automotive industry.

Keywords: Design method, Machining, Rapid manufacturing, Octree, Manufacturability, Modularity

Discipline : Sciences de l'Ingénieur